

**Институт машиноведения, автоматике и геомеханики
Национальной академии наук Кыргызской Республики**

**Кыргызский государственный технический
университет им. И. Раззакова**

Диссертационный совет Д 05.24.703

На правах рукописи
**УДК: 621.7.01
621.7.015**

Наумова Маргарита Геннадьевна

**Разработка лазерной технологии, повышающей качество
маркировки
металлической продукции путем формирования на ней
цветных изображений**

05.02.08– технология машиностроения

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бишкек – 2025

Работа выполнена на базе Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС».

Научный Морозова Ирина Георгиевна

руководитель: кандидат технических наук, доцент, Университет науки и технологий МИСИС, кафедра Инжиниринга технологического оборудования

**Официальные
оппоненты:**

**Ведущая
организация:**

Защита диссертации состоится _____ 2025 года в ____ часов на заседании диссертационного совета Д 05.24.703 по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук при Институте машиноведения, автоматике и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики и Кыргызском Государственном техническом университете им. И. Раззакова Министерства образования и науки Кыргызской Республики по адресу: 720055, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23.

Ссылка для доступа к видеоконференции защиты диссертации:

<https://vc.vak.kg/b/052-xlj-xui-jwa>.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Института машиноведения, автоматике и геомеханики Национальной академии наук Кыргызской Республики (720055, г. Бишкек, ул. Скрябина, 23) и Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова (720044, г. Бишкек, ул. проспект Ч. Айтматова, 66) и на сайте Национальной аттестационной комиссии при Президенте Кыргызской Республики:

<https://vakkr13@yandex.com>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2025 года.

Ученый секретарь диссертационного
совета, к.т.н., с.н.с.

Эликбаев К.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Разработанная технология нанесения цветных изображений на металлические поверхности может быть эффективно использована для печати товарных знаков, защищающих высококачественную продукцию от подделок, для классификации деталей в микротехнологиях. При этом очень важным является тот факт, что изображение наносится на поверхность металла с высокой точностью без механического воздействия на изделие. Это позволяет сделать вывод о том, что тема диссертационной работы является, безусловно, актуальной.

Благодаря качественной маркировке осуществляют строгий учет каждой единицы изделия, выпускаемого предприятием и контроль за его передвижением не только по самому предприятию, но и при реализации. Вследствие особенностей технологических процессов, иногда маркировка изделий массового производства должна быть доступна восприятию обслуживающим персоналом без приборов и вопрос о правильном применении той или иной детали требует очень быстрого ответа. В этих случаях цветная лазерная маркировка незаменима.

Факторы влияния на процесс получения цветового изображения на металлических поверхностях, изучены относительно мало и узконаправленно и поэтому требуют дальнейшего исследования с целью выявления, систематизации и определения взаимодействия этих факторов.

Целью работы является совершенствование процесса цветной лазерной маркировки металлургической продукции на основе исследования и разработки режимов лазерной обработки с целью формирования цветных изображений на металлической поверхности.

Задачи исследования

1. Исследовать влияние микрогеометрии сложного регулярного рельефа и шероховатость поверхности на цветное окрашивание при лазерной маркировке.
2. Разработать режимы нанесения на металлическую поверхность цветных изображений, путем лазерной модификации небольшого слоя материала.
3. Разработать возможный способ автоматизации при подборе параметров лазерной маркировки.

Методы исследований. В работе было проведено: металлографическое исследование, рентгеноспектральный анализ, применен метод секущих, феноменологический метод. Для достижения поставленных задач использовалось современное оборудование: импульсный волоконный лазер HansLaserMars; световой оптический микроскоп AxioObserver D1m; оптический микроскоп UnionVersamed 2; многофункциональный рентгеновский дифрактометр Rigaku; электронный сканирующий микроскоп TESCAN VEGA3 SB.

Объект исследования – поверхности из стали и цветных металлов, в том числе покрытия, окрашенные в различные цвета в результате лазерной маркировки с различными параметрами.

Предметами исследований являются определение влияния микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности на цветовое окрашивание при лазерной маркировке; определение влияния теплофизических характеристик материала-подложки на формирование цветового изображения на материале-покрытии при ЦЛМ.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Влияние микрогеометрии сложного регулярного рельефа и шероховатости поверхности позволяет определить заданную цветовую гамму изображений при лазерной маркировке.

2. Режимы лазерной маркировки хромированных поверхностей, позволяющие получать контрастные, считываемые стандартными устройствами изображения за счет управления тремя основными параметрами лазерного маркировочного комплекса.

3. Программа для подбора параметров лазерной маркировки «Лазкон» на языке программирования JavaScript, позволяющая автоматизировать процесс получения цветовых изображений на поверхности различных металлических материалов.

Научная новизна

1. Научно обоснованы рекомендации по расчету и подбору технологических режимов лазерного маркировочного комплекса для получения на металлических поверхностях заданных контрастных изображений;

2. Разработка методики автоматизации процесса формирования воспроизводимых контрастных изображений на металлических поверхностях в процессе лазерной обработки при которых не происходит появление трещин в оксидных пленках.

Степень обоснованности и достоверности полученных научных результатов

Обеспечена проведением экспериментов в лабораторных и производственных условиях на сертифицированном оборудовании с использованием хорошо отработанных методов обработки экспериментальных данных с применением информационных технологий, опытно-промышленным опробованием результатов работы.

Значимость полученных результатов

На основании исследования ЦЛМ на металлические поверхности и полученных результатов разработана программа для работы с базой данных для получения четкого цветного изображения на конкретной марке металла при лазерной обработке.

Реализация результатов работы Результаты работы переданы в производство, что подтверждается соответствующими актами внедрения на предприятиях: ООО «Уфимский компрессорный завод», ООО НТЦ «ТСМ» ООО «СОЛИД ЛАЙН».

Апробация результатов.

Работа выполнена в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» государственного задания Минобрнауки России в сфере научной деятельности на 2014-2016 гг. (Задание № 2014/113). А также в рамках Договора подряда № ГПХ22-2019/291 от 01.04.2019 на тему «Исследование параметров цветной лазерной маркировки металлических поверхностей».

Основные результаты и положения диссертации доложены на научных конференциях.

1. Юбилейной десятой ежегодной международной научно-практической Интернет-конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований‘2015» (с 17 по 29 марта 2015 г.). Проект SWorld (www.sworld.education)

2. Международная научно-техническая конференция Пром-Инжиниринг 2019 25-29 марта в город Сочи (<http://icie-rus.org/icie2019-rus.html>).

3. «Научно-практические конференции студентов НИТУ «МИСиС». Под редакцией С.М. Горбатюка Киров, 2016 г, с. 54-58 «Феноменологическое исследование возможностей создания

управляемого формирования цветowych изображений на металлической поверхности».

4. «Научно-практические конференции студентов НИТУ «МИСиС» Под редакцией С.М. Горбатука. Киров, 2017 г, с. 37-40 «Влияние параметров лазерного излучения на топологию и цветовую гамму металлической поверхности».

5. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). 2019.

Личный вклад автора. На всех этапах выполнения диссертационной работы автор принимал прямое участие в постановке задач исследования, в планировании и методическом обеспечении эксперимента, в проведении большинства экспериментальных измерений, в обсуждении полученных результатов и формулировании выводов. Вся экспериментальная работа и необходимые расчёты проводились соискателем лично или при его непосредственном участии.

Публикации. По материалам диссертации имеется 18 публикаций, 5 из которых входят в перечень рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК, 9 статей опубликованы в единой базе рецензируемой научной литературы Scopus. Научометрический показатель, индекс Хирша (h-индекс) автора равен 9.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка публикаций, списка использованных источников, включающего 47 наименований, 3 приложения. Работа изложена на 130 страницах машинописного текста, содержит 46 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Введение

Лазерная маркировка изделий — это перспективное направление в области повышения защиты продукции от подделки, а формирование цветowego лазерного изображения расширяет возможности данного способа идентификации продукции.

Лазерная маркировка обладает высокими параметрами долговечности, что позволит продукции быть легко идентифицированной с течением времени. Данное преимущество компенсирует высокую стоимость специализированного оборудования для маркировки.

В машиностроении излучатель лазерного луча совмещают с роботизированными установками, нанесения маркировки на поверхностях с различной геометрической формой. Скорость нанесения маркировки позволяет применять данный метод в потоке технологического процесса производства кузовных элементов.

Представленные в работе режимы ЦЛМ могут обеспечить нанесение на поверхности металлических материалов сложных многоцветных маркировочных изображений, в том числе и широкой цветовой гаммы, распространяющейся не только на изображения логотипов или специальных символов, но и на кодировочные коды, что позволяет применять такого типа маркировку для защиты изделий от подделок.

В первой главе приведен обзор и анализ научно-технической и патентной литературы, поставлены задачи исследования.

Рассмотрены вопросы термического воздействия на поверхность металлов с помощью импульсного лазерного излучения, описана работа лазерного гравера RAYMARK CNC MARK 2.

Представлены вопросы, связанные с целями и методами лазерной маркировки изделий, определены возможности оборудования для ЦЛМ металлов. Изложены современные научные взгляды на процесс формирования цветового изображения и рассмотрены факторы, влияющие на процесс окрашивания поверхности металлов. Однако, сведений о системном изучении влияния параметров микрогеометрии сложного регулярного рельефа, сформированного в результате ЦЛМ, на формирование цветового окрашивания в научных источниках нет. Поэтому для получения заданной маркировки необходимо, прежде всего, выявление зависимости получаемого цветового изображения от параметров лазерной маркировки, фазового состава оксидных пленок и микрогеометрии поверхности, включая ее шероховатость.

Вторая глава посвящена разработке методики проведения исследований.

Для нанесения цветного изображения на опытные металлические пластины использован импульсный волоконный лазер марки YLP-ФиHansLaserMars. С помощью программного обеспечения (MarkingSoftware6.0) задавались необходимые режимы лазерной обработки: геометрические параметры, длина и ширина

маркируемого объекта, параметры лазерного излучения, скорость сканирования, перемещения лазерного луча, стратегия заливки.

Для проведения исследований выбраны металлические материалы с разными теплофизическими характеристиками: сталь 12X18H10T; сталь 08 и латунь Л63 с покрытием, нанесенным методом гальванического хромирования.

В промышленности, в частности в машиностроении, достаточно широко применяют хромирование с целью защиты продукции от коррозии или механических повреждений. Лазерная маркировка таких деталей имеет особое значение и является малоизученной проблемой.

Для оценки полученного цветового изображения произведен выбор оценочной шкалы цветов. Из многих существующих были выбраны две широко распространенные системы оценки: каталог цветов RAL и система цвета NCS.

Обоснован выбор современного оборудования и соответствующих методов исследования.

С помощью микроскопа AxioObserver D1m зафиксированы цветовые изображения микроструктур, изучена микрогеометрия сложного регулярного рельефа поверхности, обработанной лазерным излучением металлографическим методом секущих, с помощью программы Sizer. Были проведены замеры элементов структуры: зон лазерного воздействия (ЗЛВ) и зон термического влияния (ЗТВ) на поверхности образцов с дальнейшей статистической обработкой полученных результатов (рисунок 1).

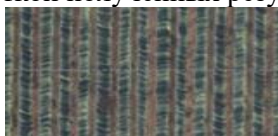


Рисунок 1 – Образец в программе Sizer

Для дополнения сведений о микрогеометрии поверхности разноокрашенных образцов (определения глубины неровностей) проводили исследования с помощью бесконтактного светового профилометра VICWU. Его принцип действия заключается в том, что свет, излучаемый источником, отражаясь от исследуемой поверхности, образует интерференционную картину, которая затем регистрируется видеокамерой. Затем данные обрабатываются и

набор интерференционных картин преобразуется в карту уровней поверхности высокого разрешения.

Химический и фазовый состав поверхности образцов изучали, используя рентгеновский дифрактометр Rigaku методом анализа тонких пленок в геометрии скользящего пучка. Этот прибор дает возможность получения сильного сигнала от оксидной пленки, не разрушая ее. При этом удается избежать интенсивного сигнала от подложки оксидной пленки – металла, что является результатом выполнения сканирования с фиксированным скользящим углом падения.

Математическую и графическую обработку результатов проводили с применением с применением информационных технологий и САПР программ AUTODESK INVENTOR, AUTOCAD.

Третья глава посвящена тонким методам исследования фазового состава и состояния оксидных пленок, образующихся на поверхности нержавеющей стали при ЦЛМ. В главе описано исследование микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности разноокрашенных образцов.

Фазовый и химический состав поверхности разноокрашенных образцов изучали, используя рентгеновский дифрактометр Rigaku, методом анализа тонких пленок в геометрии скользящего пучка.

Для полного анализа окрашенных образцов феноменологическим методом было произведено объединение в цветовые группы по шкале RAL: «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025), Красно-оранжевый (группа RAL 2001), Черно-зеленый (группа RAL 6012), Золотисто-желтый (группа RAL 1004). Результаты анализа по выделенным цветовым группам представлены в диссертационной работе.

На рисунке 2 показана микроструктура образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025) с расположением точек исследования поверхности образца. На рисунке 3 приведён образец полученного химического состава одной из выбранных для исследования точек.

На микроструктуре для исследования было выбрано порядка 8ми точек. Полный анализ каждой точки выбранной цветовой группы окрашенного образца представлен в диссертационной работе.

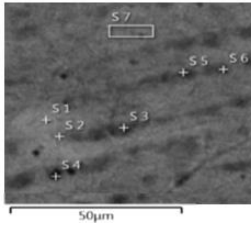


Рисунок 2 – Микроструктура образца цвета «Зеленый папоротник» с расположением точек исследования поверхности образца

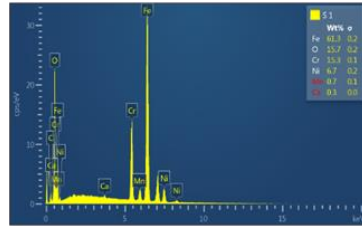


Рисунок 3 – Спектрограмма химического состава точки №S1 при изучении поверхности образца цвета «Зеленый папоротник»

Качественный фазовый анализ оксидных пленок на поверхности стали 12X18H10T, образованных в результате ЦЛМ, показал наличие окислов железа (Fe_3O_4) и никеля (NiO_4). Кроме того, наблюдали твердый раствор хрома и никеля в железе (таблица 1)

Таблица 1 – Результаты фазового анализа поверхностных пленок разноокрашенных образцов из стали 12X18H10T

Цветовая группа	Фазы	Массовая доля, %
Зеленый папоротник (группа RAL 6025)	Твердый раствор FeNi	29,0
	Fe_3O_4	56,1
Красно-оранжевый (группа RAL 2001)	Твердый раствор (FeCrNi)	52,0
	$NiO_4Fe_3b \cdot O_4$	39,6
Черно-зеленый (группа RAL 6012)	Твердый раствор (CrNi)	83,2
	$FeO \cdot Fe_2O_3$	14,8
Золотисто-желтый (группа RAL 1004)	Твердый раствор (CrNi)	83,1
	Fe_3O_4	13,1

С изменением окрашивания пленок в значительной степени изменяется массовая доля фаз, например, окислов железа: от 56 % в пленках образца «Зеленый папоротник», до 13,1 % в пленках образца Золотисто-желтый. При отличающихся параметрах лазерного излучения сформирована различная структура оксидных пленок на поверхности исследованных образцов из стали 12X18H10T (таблица 2).

Таблица 2 - Параметры лазерного излучения, использованные для получения контрастных групп RAL на стали 12X18H10T

Параметры лазерного излучения	Группа и цвет образца			
	RAL 6025 Зеленый папоротник	RAL 6012 Черно- зеленый	RAL 1004 Золотисто- желтый	RAL 2001 Красно- оранжевый
f , кГц	50	20	100	100
P , Вт	60	35	80	80
L , мм	0,005	0,01	0,03	0,005
V , мм/с	500	300	300	400
N	2	1	1	1

Исследование трещинообразования в пленках, образовавшихся на поверхности, стали 12Х18Н10Т при маркировке с различными параметрами проведено при увеличении $\times 1000$, $\times 3000$, $\times 7000$.

Электронная микроскопия при больших увеличениях показала, что при различных параметрах лазерного излучения качество оксидных пленок отличается с точки зрения трещинообразования. Формирование сетки трещин в окисных пленках не может не снизить качество наносимой лазерной маркировки.

При определенных параметрах на поверхности образцов возникает сетка трещин, которую можно отчетливо наблюдать лишь при увеличении $\times 7000$. Сетка трещин образовалась при более высоких скоростях продвижения луча (400...500 мм/с) и наименьшем расстоянии между проходами луча (0,005 мм). Повторное прохождение луча, также способствовало образованию трещин на поверхности образцов (рисунок 4).

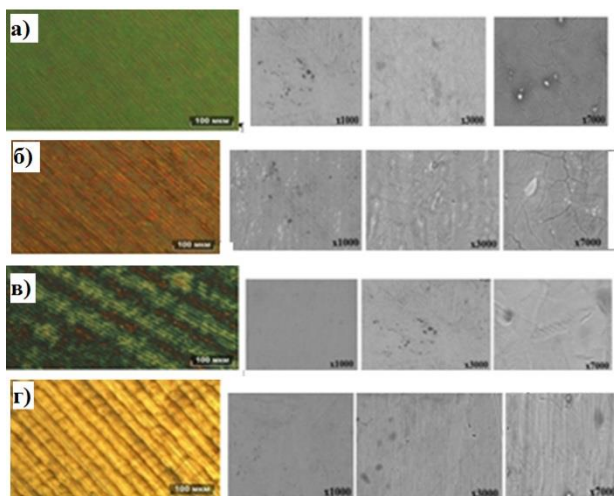
Сетка трещин образовалась при:

- скоростях продвижения луча 400...500 мм/с;
- расстоянии между проходами луча 0,005 мм;
- увеличении мощности лазерного излучения до 80 Вт;
- частоте импульсов до 100 кГц;
- повторном прохождении луча.

Трещины на обработанной поверхности отсутствуют при следующих параметрах:

- мощности лазерного излучения 35 Вт;
- частоте импульсов 20 кГц;
- скорости прохождения луча 300 мм/сек;

— однократном прохождении луча.



а) образец Зеленый папоротник; б) образец Красно-оранжевый;
в) образец Черно-зеленый; г) образец Золотисто-желтый.

Рисунок 4 – Микроструктура поверхности исследуемых образцов

Разноокрашенные оксидные пленки имеют в своем составе по несколько фаз, которые обладают, различными коэффициентами линейного расширения. Поэтому трещины более активно возникают при высоких скоростях прохождения луча или при повторно нагреве и охлаждении.

Из анализа снимков микроструктуры, следует, что на поверхности образуются «борозды», которые получаются в результате прохождения лазерного луча при «закрашивании» области воздействия. Ширина «борозды» соответствует диаметру пятна, проецируемого лазерным излучением, и составляет порядка 35 мкм. Расстояние между бороздами порядка 12 мкм, а глубина 0,3...0,8 мкм (в зависимости от полученного цвета). Кроме того, на поверхности образца видны небольшие наросты высотой 0,5...1,2 мкм в области воздействия пятна. Эти наросты образуются в результате кипения металла, формируя сложный рельеф поверхности при лазерном облучении. Это может говорить о том, что визуальное цветообразование связано не только с явлением цветов побежалости и интерференцией в тонких пленках, но и может являться результатом дифракции, т.е. сложного проявления

нескольких процессов одновременно. Следовательно, микрогеометрия сложного периодического поверхностного рельефа может оказывать значительное влияние на зрительное восприятие цветообразования, полученного в результате ЦЛМ и требует более глубокого исследования. Для оценки этого влияния нужен не только приблизительно оценочный, но системный подход. Поэтому был проведен целый ряд экспериментов для определения влияния ширины и глубины микронеровностей поверхности, модифицированной лазерным облучением с различными параметрами, на цветообразование на поверхности нержавеющей стали, латуни и хромистых гальванических покрытий на конструкционной стали и латуни.

Для определения ширины зон лазерного воздействия (ЗЛВ) и зон термического влияния (ЗТВ) в разных контрастных группах проведено металлографическое исследование с помощью светового микроскопа при увеличении $\times 200$. Был рассчитан параметр шероховатости – средний шаг неровностей профиля S_m Результаты исследования после обработки с помощью методов математической статистики систематизированы и представлены в виде таблицы 3 и диаграмм на рисунке 5.

Таблица 3 – Результаты расчетов среднего шага неровностей профиля в разных контрастных группах по 8-и точкам исследования

Группа	Серый агат RAL 7038							
S_m , мкм	24,79	25,37	23,29	20,54	25,37	21,87	21,85	21,71
σ	0,83	0,77	0,86	0,85	1,02	0,81	0,62	0,71
Группа	Фиолетовый красный RAL 4002							
S_m , мкм	25,42	25,37	25,61	25,41	25,26	26,22	20,08	20,51
σ	0,96	0,59	1,03	1,03	1,11	1,21	0,96	0,77
Группа	Серый антрацит RAL 7016							
S_m , мкм	25,71	25,48	25,91	25,75	26,01	25,64	25,43	26,21
σ	1,71	0,84	0,92	0,97	0,87	0,76	0,85	0,89

Для разных контрастных групп параметр шероховатости S_m значимо (с учетом разброса результатов замеров) отличается друг от друга. Эксперимент по изучению шероховатости оксидных пленок проводили на единой пластине из стали 12X18H10T, которая имеет одинаковую по всей поверхности одинаковую структуру и шероховатость.

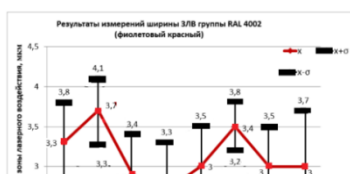




Рисунок 5 – Результаты измерений ширины ЗЛВ

Кроме расчёта среднего шага неровностей профиля при исследовании микрогеометрии сложного регулярного рельефа на поверхности маркированного металла была изучена глубина неровностей профиля с помощью бесконтактного профилометра VICWU.

Для исследования подобраны образцы из группы красного и зеленого цветов по шкале RAL. Полученные параметры шероховатости исследованных образцов отображены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты измерения шероховатости

Группа и цвет образца	Параметр шероховатости	
	R_a , мкм	R_z , мкм
Группа RAL 6025Зеленый папоротник	$0,26 \pm 0,01$	$3,06 \pm 0,39$
Группа RAL 2001Красно-оранжевый	$0,17 \pm 0,02$	$1,87 \pm 0,25$

Профилограмма исследованных участков поверхности исследуемой области, представлена на рисунке 6.

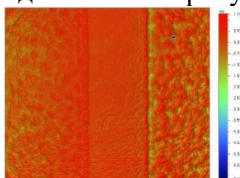
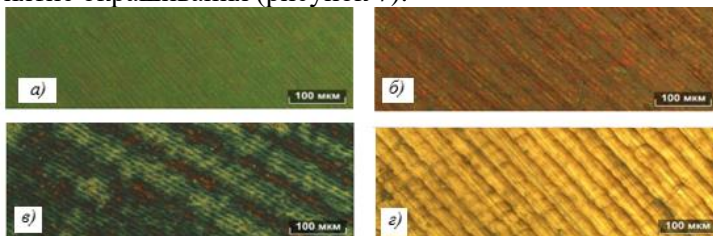


Рисунок 6 – 3D изображение поверхности исследуемой области

Увеличение высоты неровностей в 1,5 раза (благодаря двойному проходу луча при прочих равных условиях), кардинально меняет цветовую окраску поверхности с красной на зеленую.

Исследования регулярных рельефов поверхности, образующихся в результате ЦЛМ с различными параметрами, показали влияние микрогеометрии этих рельефов на зрительное восприятие окрашивания (рисунок 7).



а) образец Зеленый папоротник; б) образец Красно-оранжевый; в) образец Черно-зеленый; г) образец Золотисто-желтый.

Рисунок 7 – Снимки, полученные с помощью оптического микроскопа при увеличении $\times 200$

Проведенное исследование показало влияние микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности, сформированного при ЦЛМ, на цветообразование на поверхности нержавеющей стали.

В машиностроении излучатель лазерного луча совмещают с роботизированными установками, нанесения маркировки на поверхностях с различной геометрической формой. Скорость нанесения маркировки позволяет применять данный метод в потоке технологического процесса производства. Для применения этих возможностей определены режимы ЦЛМ на поверхность стали 12X18H10T при получении цветов, соответствующих ряду контрастных групп по шкале RAL и установленные режимы лазерной обработки позволяющие избежать появления трещин в оксидных пленках.

Четвертая глава посвящена изучению возможностей и закономерностей лазерной маркировки хромистых гальванических покрытий углеродистой стали 08 и латуни Л63.

Рассмотрена зависимость получаемого цветового изображения при ЦЛМ металлических пластин с покрытием от

параметров лазерного излучения и теплофизических характеристик обрабатываемых материалов. В настоящее время не известны работы, посвященных изучению гравировки и маркировки металлических покрытий, поэтому данное исследование представляет научный и практический интерес. Хромовые покрытия не способны создавать с железом гальваническую пару и поэтому не могут электрохимически защищать железо. При взаимодействии с концентрированной азотной кислотой на поверхности хрома образуется нерастворимая оксидная пленка, данный процесс называется пассивацией хрома. Хром не реагирует с органическими кислотами, а также с сероводородом. При взаимодействии с воздухом атмосферы не меняет своего цвета, так же покрываясь пассивной пленкой, которая препятствует дальнейшему разрушению металла.

Выбор для исследования образцов из стали и латуни обоснован широким распространением в промышленности, и их различными теплофизическими свойствами (таблица 5).

Покрытие образцов гальваническим хромом позволило уравнивать для обоих образцов такой параметр материала как коэффициент отражения. Этот параметр влияет на эффективность лазерной обработки. Чем выше этот коэффициент, тем большую мощность лазерного излучения нужно использовать для нанесения маркировки на поверхность. Для проведения эксперимента было нанесено покрытие хрома толщиной 1 мкм.

Таблица 5 –Теплофизические характеристики металлов подложки

Характеристика	Сталь 08	Латунь Л63
Теплоемкость, кДж/(кг ⁰ С)	0,381	0,481
Теплопроводность, Вт/(м ⁰ С)	60	110
Температуропроводность, м ² /с	12,5	26,4

Даная толщина является рекомендуемым значением при хромировании производственных изделий.

Для получения толщины покрытия хрома 1 мкм на стальной и латунной пластинах было затрачено 2 минуты.

С помощью тестовых проходов сформировалось понимание, какие параметры лазерного излучения необходимы для формирования цветового изображения и в каких диапазонах необходимо корректировать данные параметры для получения

различных цветов. Тестовое изображение представлено на рисунке 8. Высота букв 5 мм.



Рисунок 8 – Лазерная цветная маркировка хромистого покрытия

Полученная в результате научных исследований различная цветовая гамма, говорит о том, что происходят разные химические реакции в области лазерной обработки. Можно сказать, что такой результат дают различные теплофизические показатели двух испытуемых хромированных образцов.

Анализируя полученные результаты, можно утверждать, что благодаря более быстрому разогреву и более интенсивному отводу тепла при обработке латунного образца, покрытого хромом, получены цветовые изображения отличные от цветовых изображений, полученных при аналогичных параметрах лазерной обработки хромированного стального образца. Сталь обладает более медленным по сравнению с латуной разогревом и более медленным остыванием. Теплофизические характеристики влияют на формирование температурного поля и соответственно время протекания химической реакции, в результате которой образуется оксидная пленка разной толщины. Толщина пленки зависит от интенсивности протекания химической реакции, а интенсивность зависит от температуры зоны термического влияния и зоны лазерного воздействия.

Проведенные исследования показали, что, применяя параметры лазерной маркировки, представленные в таблице 6, при условии использования образцов, соответствующих исследуемым, получено воспроизведение цветовых изображений, представленных на рисунке 9.

Таблица 6 – Режимы лазерной маркировки опытных образцов

Номер сегмента	Расстояние между растрами, мм	Скорость прохода, мм/с	Число проходов	Мощность лазерного излучения, % (от 20 Вт)	Частота импульса, кГц	Величина расфокусировки
----------------	-------------------------------	------------------------	----------------	--	-----------------------	-------------------------

1	0,01	50	1	35	20	0
2	0,01	50	3	30	20	0
3	0,01	100	2	40	20	0
4	0,01	500	1	95	100	5
5	0,01	500	1	95	100	3
6	0,01	500	1	95	100	2
7	0,01	500	1	95	100	1
8	0,01	500	1	95	100	0

Для конкретного материала, применяв разную энергию воздействия и меняя коэффициент перекрытия можно получить одинаковые цветовые образцы маркировки и, наоборот, зная точные параметры лазерного луча на одном материале получить разные оттенки цветовой гаммы. При этом идентификация цветов проводилась с помощью специализированной программы машинного зрения.

Цвета идентифицировали с помощью шкалы цветов NCS (англ. Natural Color System, естественная система цвета). При этом производилось сравнение оригинального цвета по NCS с цветом, зафиксированным профессиональной фотокамерой, имеющей расширение 12 мегапикселей.



Рисунок 9 – Воспроизведение цветовых изображений, полученных на хромированных поверхностях, стали 08 и латуни L63

Полученные в ходе работы данные использованы для написания программного обеспечения для лазерной установки на языке программирования JavaScript. Целью программы является помощь оператору лазерного станка в подборе параметров для различных материалов и получении на них цветного изображения.

Наличие подобной программы может упростить работу по нанесению цветной маркировки на металлические поверхности и увеличить производительность работы операторов лазерного

оборудования. ПО представляет собой базу данных с параметрами лазерной маркировки, которые применялись для нанесения изображения на образцы, и цветов, полученных в ходе работы. Задачей приложения будет являться предоставление параметров лазерного луча для выбранного металла в зависимости от выбранного цвета, который нужно получить на материале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Изучено влияние фазового состава оксидных пленок на поверхности металла при термическом импульсном лазерном воздействии в диапазоне формирования цветных оксидных структур, а также трещинообразование. Исследование показало, что изменению окрашивания пленок в значительной степени соответствует изменение массовой доли оксидов железа. Установлено, что при определенных параметрах лазерного излучения на поверхности образцов возникает сетка трещин, которую можно наблюдать, начиная с увеличения $\times 7000$. Сетка трещин образовалась при скоростях продвижения луча 400...500 мм/с и расстоянии между проходами луча 0,005 мм. Повторное прохождение луча также способствовало образованию трещин на поверхности образцов.

2. Выявлено влияние микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности, сформированного при термическом импульсном лазерном воздействии на цветные изображения на поверхности нержавеющей стали. Установлено, что изменение глубины неровностей регулярного рельефа на поверхности нержавеющей стали полностью изменяет цвет окрашивания поверхности; при этом параметры шероховатости изменялись в диапазоне $Ra = 0,261...0,167$ мкм и $Rz = 3,063...1,870$ мкм.

3. Определены режимы термического лазерного воздействия для получения заданных цветов на поверхности нержавеющей стали, соответствующих ряду контрастных групп по шкале RAL и хромированных поверхностях стали 08 и латуни Л63, на основании которых разработана программа для работы с базой данных полученных результатов при лазерной обработке металлических образцов с покрытием.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Наумова М.Г. Феноменологическое исследование возможностей создания управляемого формирования цветowych изображений на металлической поверхности / И.Г. Морозова, М.Г. Наумова // Сборник научных трудов студентов и аспирантов НИТУ МИСиС. – 2016 г. Киров. – с. 54-58,5С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=27361421>
2. Naumova M.G. Effective laser technologies for production of metal products and tools / L. M. Glukhov, S.M. Gorbatyuk, M.G. Naumova, I.G. Morozova // Metallurgist. – 2016. – Vol. 60, Issue 3. – p.1-6С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35526423>
3. Naumova M.G. Color Mark Formation on a Metal Surface by a Highly Concentrated Energy Source / S.M. Gorbaturk, M.G. Naumova, I.G. Morozova // Metallurgist. – September 2016. – Vol. 60, Issue 5P. – 646-650 5С. Режим доступа <https://elibrary.ru/item.asp?id=30994256>
4. Наумова М.Г. Эффективные лазерные технологии производства металлопродукции и инструмента / Л.М. Глухов, С. М. Горбатюк, М.Г. Наумова, И.Г. Морозова // Журнал Металлург. – №3 2016. – с. 80-85 5С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26505312>
5. Наумова М.Г. Формирование цветной маркировки поверхности металла с помощью высококонцентрированного источника энергии / С.М. Горбатюк, И.Г. Морозова, М.Г. Наумова // Журнал Металлург. – 2016 г. – №6 – с. 91-94, 4С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=26527002> 3 Naumova M.G.
6. Reindustrialization Principles in the Heat Treatment of Die Steels / S.M. Gorbatyuk, M.G. Naumova, I.G. Morozova // Steel in Translation. – No. 5, 2017. – Vol. 47, p. 308-312 5С. Режим доступа: <https://link.springer.com/article/10.3103/S0967091217050047>
7. Наумова М.Г. Разработка рабочей модели процесса реиндустриализации производства термической обработки штамповых сталей/ Горбатюк С.М., Морозова И.Г., Наумова М.Г.// Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том. 60. №. 5, ISSN 0368-0797, с. 410–415. Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29197735>

8. Наумова М.Г. Влияние параметров лазерного излучения на топографию и цветовую гамму металлической поверхности / М.Г. Наумова, В.А. Наговицин, И.Г. Морозова // Сборник научных трудов студентов и аспирантов НИТУ МИСиС. – 2017 г. – Киров. – с. 37-40, 4С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=28992018>

9. Наумова М.Г. Качественный рентгеноспектральный анализ поверхности стали, обработанной лазерным излучением / М.Г. Наумова, А.А. Сафронова // Сборник научных трудов студентов и аспирантов НИТУ МИСиС. – 2018 г. – Киров. – с. 108-111, 4С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32711032>

10. Наумова М.Г. Создание маркировки медного сплава по изменению топологии его поверхности под воздействием лазерной термической обработки / И.Г. Морозова, М.Г. Наумова, А.Ю. Зарапин, П.В. Борисов // Журнал Metallurg. – 2018 г. – № 5 – 4С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35000814>

11. Naumova M.G. Copper Alloy Marking by Altering its Surface Topology Using Laser Heat Treatment / I.G. Morozova, M.G. Naumova, A. Y. Zarapin, P.V. Borisov // Metallurgist, – 2018. – 62(5-6). – с. 464-469 6С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35748513>

12. Наумова М.Г. Применение лазерной маркировки для автоматизации технологического процесса производства трубной продукции в условиях ПАО ЧТПЗ / М.Г. Наумова, П.В. Борисов // Сборник научных трудов студентов и аспирантов НИТУ МИСиС. – 2018 г. – Киров. – с. 112-115, 4С. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=32711033>

13. Naumova M.G. Investigating the features of color laser marking process of galvanic chrome plating in order to create a controlled color image formation at given marking. / M.G. Naumova, I.G. Morozova, P.V. Borisov // Materials Today: Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment. – 2019. – Vol. 19. – pp. 2405-2408. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.044>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43249538>

14. Naumova M.G. Study of metal surface with color image obtained with laser marking / I.G. Morozova, M.G. Naumova, P.V. Borisov // Сборник трудов конференции "2019 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=43249396>

15. Naumova M.G. Using the similarity theory for description of laser hardening processes. / N.A. Chichenev, S.M. Gorbatyuk, M.G. Naumova, I.G. Morozova // – 2020. – CIS Iron and Steel Review. – Vol. 19. – pp. 44-47. – DOI: <https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.01.09>. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=45443759>
16. Naumova M.G. Effect of laser treatment modes on metal surface marking color. / S.M. Gorbatyuk, I.G. Morozova, M.G. Naumova, N.A. Chichenev. // CIS Iron and Steel Review. – 2020. – Vol. 20. – pp. 37-40. – DOI: <https://doi.org/10.17580/cisirs.2020.02.09>. Режим доступа:
17. Naumova M.G. Qualitative phase analysis of oxide films on the surface of steel 12Kh18N10T, formed as a result of a given laser marking. / I.G. Morozova, M.G. Naumova, V.A. Nagovitsyn, R. Yu. Kazbekov // Metallurg, –2023. – Vol. 67. – No. 2, pp. 63-69. – DOI: https://doi.org/10.52351/00260827_2023_02_63. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=61896929>
18. Наумова М.Г. Качественный фазовый анализ оксидных пленок на поверхности стали 12Х18Н10Т, образованных в результате заданной лазерной маркировки/ И.Г. Морозова, М.Г. Наумова, В.А. Наговицын, Р.Ю. Казбеков // Metallurg. – 2023. – № 2. – С. 63-69. – DOI 10.52351/00260827_2023_02_63. Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50285189>

Наумова Маргарита Геннадьевнанын 02.05.08 – машина куруу технологиясы адистиги боюнча техника илимдеринин кандидаты илимий даражасын алуу үчүн сунушталган «Металл буюмдарын түстүү сүрөттөрдү калыптандыруу аркылуу маркалоонун сапатын жакшыртуучу лазердик технологияны иштеп чыгуу» деген темадагы диссертациясынын

РЕЗЮМЕСИ

Түйүн сөздөр: лазер, роботтук белгилөө, контрафакттан коргоо, түстүү лазердик белгилөө, дат баспас болот, хром каптоо, микроструктура, түрдүү түстөгү үлгүлөр.

Изилдөө объектиси болуп болоттон жана түстүү металлдардан жасалган беттер, анын ичинде ар кандай параметрлер менен лазердик белгилөөнүн натыйжасында ар кандай түскө боёлгон жабуулар саналат.

Изилдөөнүн максаты - металл бетинде түстүү сүрөттөрдү түзүү үчүн лазердик иштетүү режимдерин изилдөөнүн жана иштеп чыгуунун негизинде металлургиялык продукцияны түстүү лазер менен белгилөө процессин өркүндөтүү болуп саналат.

Изилдөө ыкмалары: металлографиялык экспертиза, рентген-спектралдык анализ, секанттык метод, феноменологиялык метод. Жабдуулар: импульстук була лазери HansLaserMars; жарык оптикалык микроскоп AxioObserver D1m оптикалык микроскоп UnionVersamed 2; көп функционалдуу рентген дифрактометр Ригаку; электрондук сканерлөөчү микроскоп TESCAN VEGA3 SB.

Алынган натыйжалар жана алардын жаңылыгы: түстүү сүрөттөрдү колдонуу үчүн жабдууларды тандоо негиздүү. Фазалык составдын жана оксид пленкаларындагы жаракалардын пайда болушунун металлдын бетине тийгизген таасири изилденген. Дат баспас болоттун бетиндеги түстүү сүрөттөргө термикалык импульстук лазердик нурлануу астында пайда болгон татаал регулярдуу беттик рельефтин микрогеометриясынын таасири аныкталды. Дат баспас болоттон жасалган бетинде көрсөтүлгөн түстөрдү алуу үчүн жылуулук лазердик нурлануу режимдери аныкталган. Капталган металл үлгүлөрүн лазердик иштетүүдө алынган натыйжалардын маалымат базасы менен иштөө үчүн программа иштелип чыккан

РЕЗЮМЕ

диссертация Наумовой Маргариты Геннадьевны на тему: «Разработка лазерной технологии, повышающей качество маркировки металлической продукции путем формирования на ней цветных изображений» представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.08 – технология машиностроения

Ключевые слова: лазер, роботизированная маркировка, защита от подделок, цветная лазерная маркировка, нержавеющая сталь, хромистое покрытие, микроструктура, разноокрашенные образцы.

Объект исследования - поверхности из стали и цветных металлов, в том числе покрытия, окрашенные в различные цвета в результате лазерной маркировки с различными параметрами.

Цель исследования – совершенствование процесса цветной лазерной маркировки металлургической продукции на основе исследования и разработки режимов лазерной обработки с целью формирования цветных изображений на металлической поверхности.

Методы исследований: металлографическое исследование, рентгеноспектральный анализ, применен метод секущих, феноменологический метод. Оборудование: импульсный волоконный лазер HansLaserMars; световой оптический микроскоп AxioObserver D1m; оптический микроскоп UnionVersamed 2; многофункциональный рентгеновский дифрактометр Rigaku; электронный сканирующий микроскоп TESCAN VEGA3 SB.

Полученные результаты и их новизна: обоснован выбор оборудования для нанесения цветowych изображений. Изучено влияние фазового состава и трещенообразование в оксидных пленках на поверхности металла. Выявлено влияние микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности, сформированного при термическом импульсном лазерном воздействии на цветные изображения на поверхности нержавеющей стали. Определены режимы термического лазерного воздействия для получения заданных цветов на поверхности нержавеющей стали. Разработана программа для работы с базой данных полученных результатов при лазерной обработке металлических образцов с покрытием.

SUMMARY

of the dissertation of Margarita Gennadyevna Naumova on the topic: "Development of laser technology that improves the quality of marking of metal products by forming color images on them" submitted for the degree of candidate of technical sciences in the specialty 05.02.08 - "Mechanical engineering technology"

Keywords: laser, robotic marking, protection against counterfeiting, color laser marking, stainless steel, chromium coating, microstructure, multi-colored samples.

Object of the study - surfaces made of steel and non-ferrous metals, including coatings painted in different colors as a result of laser marking with different parameters.

The aim of the study is to improve the process of color laser marking of metallurgical products based on the research and development of laser processing modes in order to form color images on a metal surface.

Research methods: metallographic examination, X-ray spectral analysis, the intercept method, the phenomenological method were applied. Equipment: pulsed fiber laser HansLaserMars; light optical microscope AxioObserver D1m; optical microscope UnionVersamed 2; multifunctional X-ray diffractometer Rigaku; electron scanning microscope TESCAN VEGA3 SB.

The results obtained and their novelty: the choice of equipment for applying color images is substantiated. The influence of the phase composition and crack formation in oxide films on the metal surface is studied. The influence of the microgeometry of the complex regular surface relief formed by thermal pulsed laser action on color images on the surface of stainless steel is revealed. The modes of thermal laser action are determined to obtain the specified colors on the surface of stainless steel. A program is developed for working with a database of the results obtained during laser processing of coated metal samples.