

**Институт машиноведения, автоматики 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 Абсадыков Бахыт Нарикбаевич

оппоненты: Доктор технических наук, профессор, заместитель генерального директора Института химических наук им. А.Б. Бектурова, Республика Казахстан

Жумалиев Жекшенбай Муратбекович

Кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры Технологии машиностроения КГТУ

Ведущая

организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технологический университет "СТАНКИН".

г Москва

127994, город Москва, ГСП-4, переулок Вадковский, д. 1

Защита диссертации состоится 23 мая 2025 года в 14:00 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://stepen.vak.kg/diss_sovety/d-05-24-703.

Автореферат разослан 21 апреля 2025 года.

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



Элимбаев К.Т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. На машиностроительных предприятиях цветная лазерная маркировка (ЦЛМ) может быть основой соблюдения логистики производства, способствуя идентификации и визуализации при передаче продукции между подразделениями предприятия. Вследствие особенностей технологических процессов иногда маркировка изделий массового производства должна быть доступна восприятию обслуживающим персоналом без приборов. В этих случаях цветная лазерная маркировка незаменима.

Возможность получать многоцветные изображения в процессе лазерной обработки металлических материалов – это современный, технологичный подход, обладающий высокой вариантностью параметров процесса, так как характеристиками лазерного луча легко управлять.

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.

Актуальность диссертационной работы вызвана необходимостью научно обосновать и конкретизировать выбор параметров лазерных маркировочных комплексов для нанесения на поверхности деталей, машин и агрегатов заданных цветовых изображений

Цель работы – выявление закономерностей 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 влияния микрогеометрии сложного регулярного рельефа, фазового состава и состояния оксидных пленок на поверхности нержавеющей стали при цветной лазерной маркировке.
2. Изучить возможность и закономерность цветной лазерной маркировки хромистых гальванических покрытий углеродистой стали 08 и латуни Л63.

3. Разработать программу для осуществления автоматического выбора параметров маркировочного комплекса HansLaserMars для получения стабильно воспроизводимого цветообразования на хромированных поверхностях.

Научная новизна

1. Дано дальнейшее развитие и научное обоснование рекомендаций по подбору технологических режимов лазерного маркировочного комплекса HansLaserMars на хромированных поверхностях.

2. На поверхности стали 12X18H10T после цветной лазерной маркировки впервые проведено комплексное измерение параметров шероховатости и определено их влияние на цветообразование.

Практическая 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. Внедрена в учебный процесс кафедры ИТО НИТУ МИСИС.

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».

Экономическая значимость полученных результатов. Расчет конкретного экономического эффекта от внедрения ЦЛМ на указанных выше предприятиях невозможен, так как данная информация строго конфиденциальна. Поэтому имеет смысл сравнить применение ЦЛМ с другими способами маркировки с точки зрения маркетинга по принятым стандартам, включающие такие показатели как: рыночная стоимость технологической установки, экологическая чистота технологического процесса, потребительские характеристики. Проведенный маркетинговый анализ показывает, что технология ЦЛМ способна конкурировать с современными технологиями нанесения цветного изображения на металлическую поверхность. Она уступает только технологии термопечати, но если возникает необходимость в получении долговечного изображения с высокими разрешением и бесконтактным воздействием на материал, с минимальным воздействием на окружающую среду, то технология ЦЛМ является безусловным лидером.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Параметры шероховатости сложного регулярного рельефа поверхности стали 12X18H10T влияют на формирование цветообразования при цветной лазерной маркировке.

2. Получение стабильно воспроизводимого цветообразования на хромированных поверхностях за счет разработки системы комплексов параметров лазерного излучения на установке HansLaserMars.

3 Программа «Лазкон» автоматически выполняющая процесс подбора параметров для осуществления заданного цветообразования на хромированных поверхностях с помощью маркировочного комплекса HansLaserMars на языке программирования JavaScript.

Личный вклад соискателя. 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.

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. Горбатюка. 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.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. 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. Наукометрический 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.

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.

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.

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

Существует ряд научных школ, изучающих различные особенности цветной лазерной маркировки: Институт оптики при университете в г. Рочестер (США) – изучают отражающие способности металлических поверхностей при лазерной обработке; Университет Jean Monnet – Saint Etienne (Франция) – занимаются контролируемым формированием наноструктур под воздействием лазерного излучения; Санкт-Петербургский лазерный центр (Россия) – изучение состава слоев оксидных пленок при лазерной обработке нержавеющей стали, латуни и титана.

Рассмотрены вопросы термического воздействия на поверхность металлов с помощью импульсного лазерного излучения, описана работа лазерного гравера HansLaserMars.

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 HansLaserMars. 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.

Методы исследований: металлографическое исследование, рентгенноспектральный 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, 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; цветообразование на хромированных поверхностях металлов с различными теплофизическими свойствами

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).

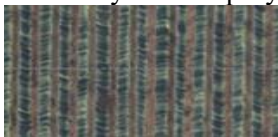


Рисунок 1 – Образец типовой микроструктуры

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 удастся 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.

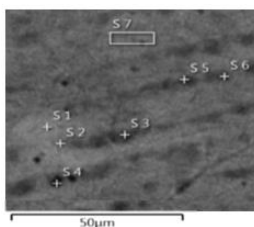


Рисунок 2 – Микроструктура образца цвета «Зеленый папоротник» с расположением точек исследования поверхности образца

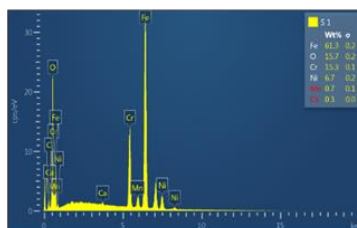


Рисунок 3 – Спектрограмма химического состава точки №S1 при изучении поверхности образца цвета «Зеленый папоротник»

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)

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 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 ₃ O ₄	56,1
Красно-оранжевый (группа RAL 2001)	Твердый раствор (FeCrNi)	52,0
	NiO ₄ Fe ₃ 6·O ₄	39,6
Черно-зеленый (группа RAL 6012)	Твердый раствор (CrNi)	83,2
	FeO·Fe ₂ O ₃	14,8
Золотисто-желтый (группа RAL 1004)	Твердый раствор (CrNi)	83,1
	Fe ₃ O ₄	13,1

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 12X18H10T 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

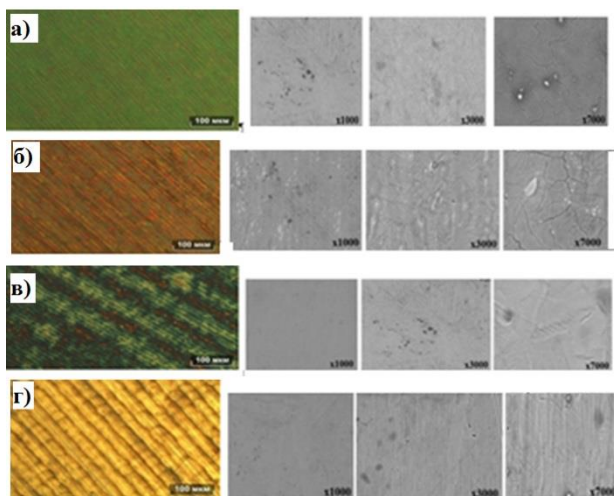
при увеличении $\times 7000$. Сетка трещин образовалась при более высоких скоростях продвижения луча (400...500 мм/с) и наименьшем расстоянии между проходами луча (0,005 мм). Повторное прохождение луча, также способствовало образованию трещин на поверхности образцов (рисунок 4).

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.

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.

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

Группа	Серый агат RAL 7038							
Sm, 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							
Sm, 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							
Sm, 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

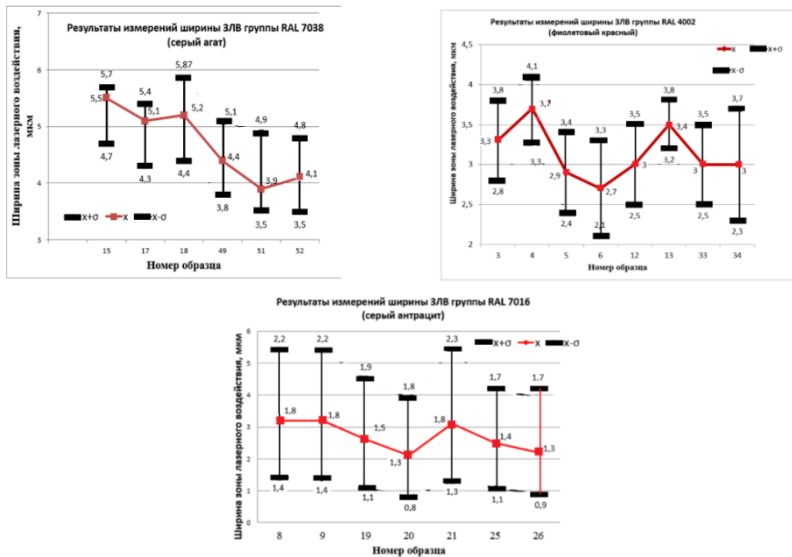


Рисунок 5 – Результаты измерений ширины ЗЛВ

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.

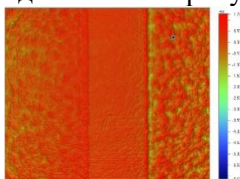
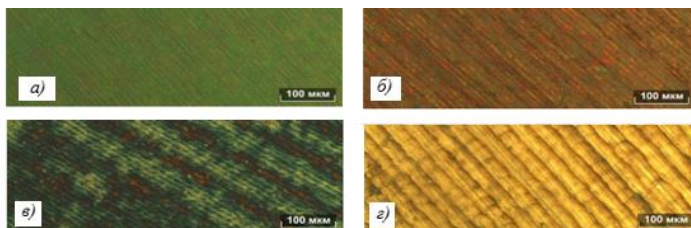


Рисунок 6 – 3D изображение поверхности исследуемой области

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 12Х18Н10Т 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 испытываемых 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 латунью 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 цветowych 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, применяя разную энергию воздействия и меняя коэффициент перекрытия можно получить одинаковые цветowe 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 Л63

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. Установлено влияние микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности, сформированного при термическом импульсном лазерном воздействии на цветные изображения на поверхности нержавеющей стали: 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. Исследование влияния фазового состава оксидных пленок на поверхности металла при термическом импульсном лазерном воздействии в диапазоне формирования цветных оксидных структур показало, что изменению окрашивания пленок в значительной степени соответствует изменение массовой доли оксидов железа.

Электронная микроскопия при больших увеличениях показала, что при различных параметрах лазерного излучения качество оксидных пленок отличается с точки зрения трещинообразования. При определенных параметрах на поверхности образцов возникает сетка трещин, которую можно отчетливо наблюдать лишь при увеличении $\times 7000$. Формирование сетки трещин в окисных пленках не может не снизить качество наносимой лазерной маркировки.

2. Определены режимы термического лазерного воздействия для получения заданных цветов на хромированных поверхностях стали 08 и латуни Л63 при условии использования образцов соответствующих исследуемым, получено воспроизведение цветовых изображений.

3. На основании данных полученных при исследовании разработана программа для работы с базой данных полученных результатов при лазерной обработке металлических образцов с покрытием. Представленная программа внедрена при проведении лабораторных занятий по курсу «Инжиниринг технологических лазерных технологий» кафедры Инжиниринга технологического оборудования НИТУ МИСИС.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Наумова М.Г. Феноменологическое исследование возможностей создания управляемого формирования цветовых 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 Metallurg. – №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 Metallurg. – 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: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=46741557>

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 // Металлург. – 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, рентгенноспектральный 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 пленок 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.



Наумова Маргарита Геннадьевна

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

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук
Подписано в печать 18.04.2025

Формат 60x84 /16. Объем 1.5 п. л. Тираж 100 экз.
Издательство: ИМАГ НАН КР, Бишкек