

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИСИС»**

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

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:

к.т.н., доцент,

Морозова Ирина Георгиевна

Москва – 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ ПО ВОПРОСУ ЦВЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ.....	10
1.1. Цели и методы маркировки полуфабрикатов и изделий.....	10
1.2. Оборудование для цветной лазерной маркировки.....	15
1.3. Взаимодействие лазерного излучения с металлической поверхностью.	16
1.4. Формирование цветового изображения при лазерной маркировке	18
1.5. Изменение спектральных свойств поверхности металла обработанной лазерным излучением	20
1.6. Лазерная маркировка металлических покрытий.....	22
1.7. Применение лазерной маркировки в промышленности для защиты от подделок.....	24
1.8. Выводы по первой главе	25
ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	28
2.1. Химический состав и свойства исследуемых материалов	28
2.2. Выбор устройства для цветной лазерной маркировки	33
2.3. Создание образцов для проведения исследования.....	37
2.4. Методы оценки цветовых изображений	46
2.5. Оборудование и методы исследования влияния микрогеометрии сложного регулярного микрорельефа поверхности образцов обработанных лазерным излучением на формирование цветового изображения.....	56
2.6. Оборудование и методы исследования влияния режимов лазерной обработки на фазовый состав и трещинообразование в оксидных пленках, образующихся на поверхности нержавеющей стали	60
2.7. Оборудование для изучения влияния различия теплофизических характеристик материала-подложки на формирование цветового изображения на материале-покрытии при ЦЛМ.....	62
2.8. Выводы по второй главе	64

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ СЛОЖНОГО РЕГУЛЯРНОГО РЕЛЬЕФА, ФАЗОВОГО СОСТАВА И СОСТОЯНИЯ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЦВЕТНОЙ МАРКИРОВКЕ	65
3.1. Микрогеометрия сложного регулярного рельефа, образующегося на металлических поверхностях при ЦЛМ	65
3.2. Металлографическое исследование микрогеометрии рельефа, полученного в результате лазерного излучения на поверхности образцов	67
3.3. Результаты качественного рентгеноспектрального анализа поверхности стали, обработанной лазерным излучением	74
3.4. Выводы по третьей главе	91
ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ ХРОМИСТЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 08 И ЛАТУНИ Л63	93
4.1. Получение и исследование цветового изображения на стали 0,8 и латуни Л63	93
4.2 Математическая модель	96
4.3 Разработка автоматизированного нанесения цветового изображения на хромированные поверхности	98
4.4 Выводы по главе четыре	101
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	102
СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ	103
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	106
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	111
Заданные параметры лазерного излучения для получения ЦЛМ на опытной пластине из нержавеющей стали 12ХН10Т	111
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Параметры лазерного излучения получения ЦЛМ	113
ПРИЛОЖЕНИЕ 3 Результаты измерения элементов изображения поверхности образцов, обработанных лазерным излучением	120

ВВЕДЕНИЕ

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 производстве ювелирных изделий и сувенирной продукции, что позволяет сделать вывод о том, что тема диссертационной работы является, безусловно, актуальной.

Цветная лазерная маркировка (ЦЛМ), осуществляемая с помощью термического воздействия импульсным лазерным излучением, является одним из самых точных и надежных современных способов защиты изделий от подделок и нанесения на изделия другой необходимой информации. При этом очень важным является тот факт, что изображение наносится на поверхность металла с высокой точностью без механического воздействия на изделие. Благодаря достижению практически дифракционного предела диаметра лазерного пучка, появилась возможность уменьшить обрабатываемую площадь. При нанесении различной информации на изготовленную деталь удастся избежать повреждения поверхности.

Промышленное применение лазерных технологий представляет практический интерес вследствие возможности использования при термическом воздействии на поверхность металлов компьютерной техники, возможности быстрой перенастройки и мобильности оборудования. Лазерное импульсное нагревание предоставляет уникальную возможность управления фазовым составом и геометрической структурой образующихся оксидов и степенью окисления металлов, что в принципе позволяет создавать полноцветное изображение на металлических поверхностях.

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. Нанесение маркировки на металлическую продукцию крайне важно и необходимо в таких отраслях как

авиационная промышленность, автомобилестроение, приборостроение, при производстве различного инструмента и т.д. Вследствие особенностей технологических процессов, иногда маркировка изделий массового производства должна быть доступна восприятию обслуживающим персоналом без приборов. Например, конвейерная сборка осуществляется в ряде отраслей в жестких пространственных и временных рамках и вопрос о правильном применении той или иной детали требует очень быстрого ответа. В этих случаях цветная лазерная маркировка незаменима.

Интерес к технологии цветной лазерной маркировки (ЦЛМ) подтверждает опубликованный Европейской технологической платформой Photonics21 «Многолетним стратегическим планом развития», в котором технология ЦЛМ входит в число перспективных исследований на 2014-2020 годы

Единственным ограничением более широкого применения метода, является недостаточная предсказуемость получаемого в результате облучения цвета. 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.

При лазерном воздействии на поверхности металла формируется сложный периодический рельеф. Это говорит о том, что визуальное феноменологическое восприятие окрашивания металлических поверхностей 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, цвет обрабатываемой поверхности определяется более сложными процессами, чем механизмом образования цветов побежалости.

Несмотря на достаточный интерес к применению цветной лазерной маркировки в промышленном производстве, для ее широкого внедрения необходимо решить еще ряд задач, связанных с ее изучением и совершенствованием. Необходимо системное исследование влияния ранее

малоизученных факторов на возникновение цвета на металлической поверхности.

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 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 не возможен, 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 высоким 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 12Х18Н10Т 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.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационная работа по своим целям, задачам, содержанию, методам исследования и научной новизне соответствует паспорта специальности 05.02.08 – технология машиностроения

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРНЫХ ДАННЫХ ПО ВОПРОСУ ЦВЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

1.1. Цели и методы маркировки полуфабрикатов и изделий

Качественная маркировка дает возможность контролировать производство изделий, как на этапе получения промежуточных полуфабрикатов, так и при выпуске и продаже готовой продукции. Нанесение маркировки на металлическую продукцию крайне важно и необходимо во многих отраслях промышленного производства. Среди современных способов маркировки – лазерная маркировка наиболее точный и надежный способ идентификации и защиты.

Маркировка, от нем. Markieren – отмечать – нанесение определённых знаков или надписей на деталь, с целью возможности её идентификации. В серийном производстве это пункт технологического процесса.

Производственная маркировка – нанесение символов на оборудование, инструменты, детали и сборочные узлы.

Методы нанесения:

- клеймение;
- электрохимическая;
- термотрансферная печать;
- каплеструйная маркировка (чернилами);
- маркировка лазером;
- маркировка ударно-точечная;
- нанесение прочерчиванием.

Клеймение – самая простейшая маркировка, осуществляемая на поверхности ударом металлического клейма или штампа на механическом прессе. Обычный набор клейм – клейма с зеркальным изображением необходимого размера букв или цифр. На детали получается прямое

изображение. Для маркировки деталей из литевых форм используют инверсные вставки, тогда на отливках получится читаемая надпись. Таким способом возможна маркировка цветных металлов и стали.

Электрохимическая. Способ маркировки широко распространён при маркировке металлов любой твёрдости. Это экономичный и распространённый способ маркировки, соперничающий с маркировкой лазером. Часто применяется для маркировки автомобильных и авиационных деталей.

Термотрансферная печать – способ печати, при котором красящий слой переносится со специальной ленты на термотрансферную этикетку для сопровождения партии деталей.

Каплеструйная маркировка. Это маркировка чернилами. Применяются каплеструйные принтеры наносящие маркировку непосредственно на деталь, преимущественно на конвейере [1].

Лазерная маркировка. Технология, при которой информация наносится лазером, который выжигает поверхность предмета. Лазерный принтер используется для нанесения графической информации на любой твёрдый материал. Для маркировки металлов хорош оптико-волоконный тип лазера, который наносит надёжную маркировку. Его преимущества – быстрота и качество.

Ударно-точечная маркировка. Процесс маркировки заключается в нанесении на поверхность металла группы точек, сумма которых оформляет линию надписи. Аппаратура управляется ЧПУ. Пневматический привод – более быстрый, зато электрический практичнее для большинства задач. Отличием от прочих методов есть то, что ударно-точечная – обеспечивает нестираемую надпись даже на деталях из пластичных материалов и закаленных металлов.

Маркировка прочерчиванием. Производится гравировкой линий на поверхности детали твёрдосплавной иглой. Так, например, наносят VIN номера на кузов легкового автомобиля. Ограничение: игла плохо наносит маркировку на очень твердый материал (45 HRC) [2].

Нанесение маркировки на металлическую продукцию крайне важно и необходимо, например, в таких отраслях как авиационная промышленность, автомобилестроение, при производстве различного инструмента, на трубах, на часах и так далее. Подобные металлические товары должны быть обязательно промаркированы, иначе отслеживание, правильная сборка и реализация будут невозможны.

1-й способ: для маркировки продукции из металлов или сплавов могут быть использованы самоклеящиеся этикетки и навесные ярлыки.

2-й способ: маркировка на подобной продукции осуществляется прямым способом (то есть, маркировка наносится непосредственно на сам товар). Выполняется с применением лазерной маркировки, передавая на товар такую информацию как штрих-код, буквенно-цифровые данные или графические изображения и т.п.

Понятно, что в металлургии целесообразнее, конечно же, применение второго варианта нанесения маркировки и этому есть вполне адекватные объяснения. Маркировка на ярлыках и этикетках является не надежной: она стирается, ее можно легко подделать и т.д., поэтому практически все крупные предприятия для маркировки своей продукции используют прямой способ.

Лазерная промышленная маркировка – это нанесение на изделие различной информации и идентификационных данных. Лазерная маркировка является одним из самых надежных современных способов защиты изделий и продукции от подделок. Преимущества лазерной гравировки и маркировки перед другими способами нанесения информации очевидны:

- широкий спектр маркируемых материалов - металлы и их сплавы, пластики, резина, силикатное и акриловое стекло, дерево, картон, кожа, керамика и др.;

- возможность нанесения на изделия промышленного производства любой, даже мелкой, информации: логотип и название производителя, товарный знак, технические данные, сквозная нумерация и штрих-код продукции, выходные параметры изделия, название детали и т.п.;

- устойчивость к интенсивному режиму использования;
- нестираемость и долговечность (износостойкость) нанесенного изображения (информации);
- отсутствие механического воздействия на изделие (бесконтактность), что дает уникальную возможность маркировки изделия в сборе;
- высокое разрешение, контрастность и качество прорисовки нанесенного изображения;
- быстрота и точность маркировки.

Технология лазерной маркировки, в настоящее время переживает подъем своего развития и популярности. Современные лазерные технологии маркировки стремительно внедряются в промышленное производство, часто вытесняя традиционные методы обработки материалов. Сфокусированный лазерный луч регулируемой мощности оказался идеальным "рабочим инструментом" для создателей нового оборудования. Лазер, как инструмент обработки материалов, работает быстро, не изнашивается и не требует приложения усилий, он экономичен, в высшей степени точен, а его воздействие легко поддается контролю и управлению.

Лазерная маркировка идеальна в процессах, где требуется высокая точность и недопустимо физическое или химическое воздействие, а также при нанесении маркировки в труднодоступных местах или в местах, подверженных воздействию агрессивной среды. Центр промышленной маркировки обеспечивает поставку оборудования, выполняет работы по пуско-наладке, ремонту, гарантийному и сервисному обслуживанию оборудования для лазерной маркировки.

Лазерный маркер можно успешно применять при маркировке нержавеющей стали, железа, латуни, анодированного алюминия и прочих металлических сплавов. Как правило, маркировка металла представляет собой логотип, серийный номер, штрих-код, номер партии. Современные лазерные маркираторы позволяют быстро и достаточно легко выполнять маркировку

совершенно в любых условиях предприятия, а также на любом производственном этапе изготовления и хранения металлической продукции [3].

Вследствие постоянно меняющихся и совершенствующихся технологий производства, например, в автомобильной промышленности - без надежной и качественной маркировки деталей не обойтись, так как конструкционные особенности различных деталей, и узлов каждый год меняются. Как правило, это влечет за собой разделение продукции на «новую» и «старую», таким образом, долговечности маркировки отводится важнейшая для производства роль. Потому как в течение гарантийного срока необходимо сохранить на деталях информацию обо всех, имеющихся на момент производства изделиях, изменениях в конструкции и технологии, а также о материале и варианте изготовления конкретного изделия.

Интерес к технологии цветной лазерной маркировки (ЦЛМ) подтверждает принятый Европейской технологической платформой Photonics21 «Многолетним стратегическим планом развития», в котором технология ЦЛМ признана одним из перспективных направлений исследований на 2014-2020 годы.

Цветная лазерная маркировка металлических поверхностей существенно расширяет возможности применения лазерной маркировки. Применение ЦЛМ, в качестве удобного и наглядного метода, может быть использовано в приборостроении при сборочных операциях, в металлургической промышленности при идентификации полуфабрикатов и нанесении логотипов на готовую продукцию, в декоративно-прикладной области и т. д [4].

1.2. Оборудование для цветной лазерной маркировки

Лазеры широко применяются в различных областях промышленности, науки и техники. Такое широкое распространение лазеры получили благодаря особым свойствам лазерного излучения. Уникальные свойства лазерного излучения обеспечили значительный прогресс и привели к совершенно новым научным и техническим решениям.

Лазерная техника – это совокупность технических средств для генерации, преобразования, передачи, приёма и использования лазерного излучения. Лазерная техника включает в себя:

- собственно лазеры;
- их элементы – излучатели, активные элементы, оптические резонаторы, лазерные затворы, источники накачки, блоки питания и управления, системы охлаждения и др.;
- устройства управления лазерным пучком – модуляторы света, дефлекторы, преобразователи частоты и др.;
- приборы, системы, установки, в которых использование лазеров определяет их функциональное назначение, – лазерные технологические установки, лазерные дальномеры, лазерные звуко- и видеопроигрыватели и т.п. [5].

Лазерная маркировка металла позволяет наиболее действенным и эффективным способом разместить на любом изделии требуемую информацию, позволяющую проводить идентификацию последнего. Данное решение является оптимальным как с точки зрения эстетики оформления, так и с учётом технологической сложности его осуществления и продолжительности выполнения соответствующих работ.

Лазерная маркировка выполняется различными устройствами, заточенными на решение как стандартных, так и узких специальных задач:

- волоконные лазеры;
- твердотельные лазеры;

- ванадатовые лазерные устройства; (Твердотельный маркировщик на кристалле Nd:YVO4; отличается высоким качеством луча M2, модой TEM00, большой глубиной фокуса и малой длиной лазерного импульса; опция: EVC с вращающейся головкой, которая может быть повернута на любой угол от +90 до -90 градусов);
- лазерные маркировщики; (применяется для глубокой лазерной гравировки);
- газовые лазеры;
- зеленый лазер (Деликатная маркировка для электроники, приборов, промтоваров и др.);
- ультрафиолетовый лазер (Деликатная маркировка для приборостроения, промтоваров и др.[5].

Маркировочные лазеры, работающие на ультрафиолетовых волнах, позволяют маркировать практически любые материалы: металлы, бумагу, пластик, стекло, кожу. Это компактные лазеры, которые могут быть удобно размещены на рабочем столе, в кожухе или в производственной линии.)

В зависимости от структуры и размеров материалов могут использоваться различные лазерные излучатели (газовый, волоконный) и типы лазеров (планшетный, гальво), чтобы добиться максимально эффективного и быстрого результата.

1.3. Взаимодействие лазерного излучения с металлической поверхностью

Лазер хорошо служит на протяжении многих лет, в частности, если речь идет о лазерной гравировке и маркировке металлов. Не только мягкие металлы, такие как алюминий, но и сталь или очень твердые сплавы можно аккуратно маркировать, разборчиво и быстро используя лазер. С некоторыми металлами можно даже создавать коррозионно устойчивые маркировки без повреждения структуры поверхности.

Металлические изделия маркируются при помощи лазера в целом ряде отраслей: Диапазон применения от маркировки промышленных серийных изделий для обеспечения отслеживаемости до индивидуализации рекламных изделий путем нанесения логотипов или названий.

Различают различные методы обработки: гравировка, абляция (удаление), отжиг, аннилинг и вспенивание. В зависимости от используемого материала и требуемого качества каждый из этих способов имеет свои преимущества и недостатки.

Аннилинг (это специальный способ лазерной маркировки металлов. Нагревание лучом приводит к окислению поверхности металла, что приводит к изменению цвета на поверхности металла.).

Отжиг. При отжиге материал при действии лазерного луча нагревается, происходит химическая реакция, которая окрашивает материал. Этот эффект возникает из-за структурного изменения поверхностного материала. Получаемая окраска зависит от температуры нагрева. Таким образом, меняя параметры лазерного излучения можно получать светлые или тёмные оттенки. Недостаток такой техники: если изделие подвергнуть воздействию высокой температуры, маркировка может сойти.

При лазерной гравировке обрабатываемый материал расплавляется лазером и затем выпаривается. Лазерный луч снимает верхний слой материала. Интенсивность излучения должна при этом превышать определённое предельное значение, так называемую пороговую интенсивность. Пороговая интенсивность для материалов с высокой электрической проводимостью достигает большой величины. Углубление конической формы, образовавшееся в результате такой обработки называется гравировкой. Лазерная гравировка считается самой быстрой формой лазерной обработки.

При абляции лазерный луч удаляет поверхностный слой, который был нанесён на базовый материал. За счёт различий в цвете между поверхностным и базовым материалом появляется контраст. Так как в этих слоях лазерное излучение очень хорошо поглощается, достаточно даже малой мощности лазера,

чтобы получать высококонтрастные изображения. Как правило, путём абляции маркируют анодированный алюминий, лакированный металл, плёнки и многослойные пластики.

При вспенивании материал под действием лазерного луча плавится. В материале образуются пузырьки газа, которые при охлаждении не исчезают. Объём материала увеличивается за счёт этих включения, обработанная лазером поверхность кажется рельефной. Маркировка в обработанных местах становится светлее остального материала.

Благодаря предельной точности лазерной маркировки можно наносить мелкие рисунки, шрифты размера 1 пт и мельчайшие геометрические фигуры. Маркировка лазером всегда отличается высоким качеством.

Лазерная маркировка перманента и при этом не изнашивается, устойчива к температурам и кислотам. В зависимости от настройки параметров определённые материалы можно маркировать, не повреждая их поверхности [6].

1.4. Формирование цветового изображения при лазерной маркировке

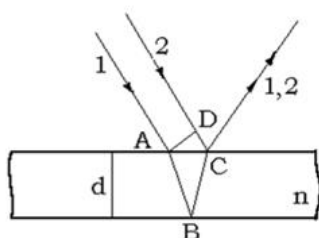
При лазерной обработке поверхности металла происходит разогрев участка, на который падает световой пучок, в результате расплавленный металл начинает активно реагировать с кислородом воздуха. Таким образом, при остывании металла, в месте взаимодействия в результате химической реакции образуются оксидные структуры. При попадании белого света на поверхность металла и прохождении его через оксидную пленку происходит явление интерференции. Такое явление наблюдается не только при обработке лазерным излучением, но и при механической и тепловой обработке металлических изделий. Примером может служить металлическая стружка, полученная при сверлении или фрезеровании (рисунок 1.1).



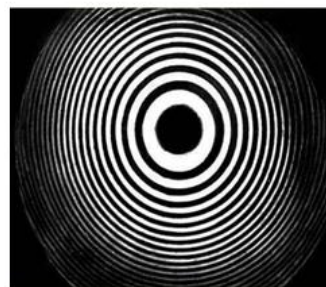
Рисунок 1.1 – Цвета побежалости

В процессе механической обработки под действием силы трения происходит сильный разогрев, который сопровождается образованием «побежалости», тонкой оксидной плёнки. Цвета, образующиеся таким образом называются цветами «побежалости».

Рассмотрим явление интерференции изображенное на рисунке 1.2. При падении монохроматической волны света 1, под углом q на плоскую параллельную поверхность имеющую параметр преломления n и толщину d , в точке, а световой луч разделится, часть этого луча отразится, а часть преломится. Далее луч дойдет до поверхности в точке В и отразится от неё.



а)



б)

а) отражение и преломление световой волны; б) картина интерференции.

Рисунок 1.2 – Интерференция световой волны

На поверхности пленки в точке A луч разделится на два: частично отразится от верхней поверхности пленки, а частично преломится. Преломленный луч, дойдя до точки B , частично преломится в воздух ($n = 1$), а частично отразится и пойдет к точке C . Волна (луч) 2, падающий под тем же углом, что и луч 1, в точку C , также отразится. Вышедшие из пленки луч 1 и отраженный 2 идут в одном направлении и являются когерентными, если их оптическая разность хода мала, по сравнению с длиной когерентности падающей волны. Если на их пути поставить собирающую линзу, то лучи сойдутся в одной из точек фокальной плоскости линзы и дадут на экране интерференционную картину, которая определяется оптической разностью хода [7].

Картина интерференции, возникающая на экране, выглядит как система чередующихся светлых и темных колец с общим центром (рисунок 1.2 б). Описанные интерференционные полосы носят название полос равного наклона, поскольку каждая полоса образуется лучами с одинаковыми углами падения. При освещении пластинки солнечным светом интерференция наблюдается только в том случае, если толщина пластинки не превышает нескольких сотых миллиметра. При освещении светом с большей степенью когерентности (например, лазерным излучением) интерференция наблюдается при отражении и от более толстых пластинок или пленок.

Поэтому исследователи изучают вопросы и закономерности, связанные с топологией окрашенной поверхности, например, общие закономерности формирования рельефа в зоне воздействия лазерного излучения в металлах с различной температурой плавления [8].

1.5. Изменение спектральных свойств поверхности металла обработанной лазерным излучением

Для создания на поверхности металла цветового изображения необходимо применять короткие лазерные импульсы. Обработывая металл короткими лазерными импульсами ученым удалось добиться от поверхности металла почти абсолютного поглощения световых волн, схожих свойств с

абсолютно черным телом. Данное свойство обработанной поверхности можно применять в высокоточных анализаторах, для их настройке и обработке, а так же поверхность с данными свойствами будет способна поглощать намного большую энергию, таким образом возможно применение в устройствах работающих на основе поглощения энергии солнца [9].

Придание металлу не только черного цвета при лазерной обработке но и других цветов уже рассматривался учеными, как например в статье научного журнала издания посвященного прикладной физике над которой трудился российский ученый Воробьев А.И и профессор Гуо. В статье изложен способ при котором поверхность металла подвергнутая лазерной обработке получает способность отражать свет в диапазоне как ультрафиолетового диапазона так и терагерцового диапазона.

Создавая на поверхности микроскопические и нанометрические структуры, размер которых не превышает длину волны падающего на поверхность света. Данные структурные компоненты(элементы расположенные под определенным углом и имеющие определенную глубину) поглощают свет с определенной длиной волны и так же отражают свет с другой необходимой длиной волны [10].

Таким образом, меняя режим лазерной обработки и интенсивность лазерного излучения, в частности, появляется возможность для создания различных структур, что в свою очередь позволяет контролировать способность металла отражать падающий свет с определенной длины волны.

Наряду с этим, появляется возможность для создания на поверхности металла структуры которая будет отражать различные световые волны под различными углами падения света. Окраски класса хамелеон уже давно используются в промышленности и в лакокрасочных покрытия автомобилей. Одним из важных аспектов обработки является, что в данном случае не используется специального покрытия и реагентов.

Данный метод создания цветового изображения работает, но утверждать, что он универсален и будет работать на всех металлах еще рано. Но уже на

сегодняшний день множество исследуемых образцов подтвердили эффективность данного метода.

На сегодняшний день остаются актуальными следующие вопросы.

Как известно лазерные излучатели имеют невысокий КПД. Для современных лазерных систем этот параметр лежит в интервале до 25%. Что означает, что только четвертая часть электрической энергии преобразуется в оптическую, большая часть энергии преобразуется в тепловую и рассеивается в пространстве. В связи с этим эффективность применения лазерных излучений в маркировке не так велика по сравнению с другими методами [11].

Важной задачей является обобщение и систематизация полученных данных о получаемых цветовых изображениях для различных металлов. Сопоставления геометрических размеров обрабатываемой поверхности теплофизических свойств обрабатываемого материала, оптических свойств материала с параметрами лазерного излучения, при котором получают цветное изображение [12].

1.6. Лазерная маркировка металлических покрытий

Из множества методов нанесения информации, как на готовое изделие, так и на полупродукт, маркировка лазерным излучением является наиболее современным и перспективным. Данный метод обладает высокой гибкостью, т.к. позволяет менять интенсивность световой энергии. Регулируя мощность излучения возможно получать различные характеристики изображения. Так же данный метод можно использовать для широкого сортамента материалов. Информация читаема как при обработке элементов из пластмассы, так и металлических элементов. С помощью лазерного излучения возможно обрабатывать поверхностей любой формы и размеров.

Применение маркировки с помощью лазерного излучения позволяет наносить информацию как непосредственно на сам материал, так и на бирки и наклейки, которые затем прикрепляются к изделию. Таким образом, появляется возможность совместить два способа нанесения маркировки, или использовать

один из них в зависимости от требуемых условий эксплуатации маркируемой детали.

Для лазерной маркировки наиболее подходящим металлом является нержавеющая сталь. Она обладает повышенной устойчивостью к температуре и обеспечивает качественную маркировку с хорошей контрастностью. Также могут быть маркированы алюминий, титан и некоторые другие металлы, но с помощью специализированных лазеров и настройки значений. Подходят разные виды металла для лазерной маркировки.

В отличие от некоторых других методов гравировки, лазерная не требует использования химических веществ и применения физической силы на объекте. Обработка создает глубокие отметки на поверхности материала, что делает их долговечными и устойчивыми к истиранию и выцветанию. Является необратимым процессом, что означает, что однажды удаленный материал нельзя вернуть или исправить. Какой металл подходит для лазерной маркировки можно посмотреть в следующем списке [13]:

- нержавеющая сталь является одним из наиболее распространенных материалов для такой процедуры. Ее поверхность хорошо реагирует на лазерный луч, что позволяет получить контрастную маркировку хорошего качества;
- медь сложна для обработки из-за ее высокой теплопроводности и отражательных свойств. Часто для разметки меди задействуется лазер с достаточно повышенной мощностью, чтобы преодолеть эти препятствия;
- алюминий подходит для лазерной обработки. Он имеет низкую поглощающую способность и хороший контраст на светлых поверхностях. Однако на темных алюминиевых поверхностях маркировка может быть менее контрастной;
- углеродистая сталь также подходит для обработки, особенно если она имеет низкое содержание легирующих элементов. Однако при высоких содержаниях легирующих компонентов маркировка может быть менее контрастной.

1.7. Применение лазерной маркировки в промышленности для защиты от подделок

Как только новая продукция получает признание на рынке, становится популярной, практически любая компания-производитель сталкивается с целым комплексом неприятностей. Во-первых, кто-то незаконно начинает выпускать товар с такой же торговой маркой без ведома и согласия владельца прав на его производство или продажу. Довольно трудно оценить моральные и материальные издержки потребителя от использования некачественных товаров под известными, да и не только, товарными знаками.

Для защиты от подделки своей продукции продавцы пытаются привнести в ее оформление нечто такое, что либо затруднительно воспроизвести, либо влечет за собой негативные для «пиратов» последствия в виде уголовной ответственности за подделку торговой марки или защищенных патентами элементов продукции. Обычно это выражается в том, что в упаковку товара, в полиграфическое исполнение этикеток, технологию производства вводят элементы защиты. На сегодняшний день к методам (элементам) защиты предъявляются следующие основные требования:

- расходы на копирование элементов защиты, в том числе за счет использования принципиально различных технологий, должны быть такими, чтобы оно было экономически невыгодным. Проще говоря, если сделать так, чтобы фальсификация обходилась в несколько раз дороже оригинала, она потеряет всякий смысл;
- использование защиты одновременно нескольких уровней – например, визуальной для потребителя и визуальной и специальной для экспертов, когда на каждом из уровней существуют свои элементы для квалифицированной идентификации по признакам подлинности;
- сохранение механической целостности защитных элементов и элементов упаковки в процессе перехода товара от производителя к потребителю и доступность проверки целостности на любом этапе;

– режимная и правовая защита, доступность контроля за производством самих защитных элементов.

Конечно, абсолютной защиты продукции от фальшивок пока никто не придумал. Практика показывает, что любую утилитарную вещь, созданную одним человеком или группой людей, практически всегда смогут повторить и другие. Несмотря на большое число уже имеющихся технологий защиты, сегодня эта проблема актуальна как никогда, а разработки в области новых, более эффективных способов защиты не только не прекращаются, но и ведутся все более активно [14].

Одним из способов защиты – является маркировка изделий в металлургической промышленности, выполненная с помощью специальных устройств.

Лазер для маркировки металлов как правило применяется для маркировки изделий с целью их отслеживания или нанесения кодов. Эти применения имеют место в электронной и электрической промышленности, в машиностроении и производстве инструментов, в обработке листового металла, медицине, производстве рекламных материалов, ювелирной отрасли и автомобильной промышленности.

Лазерная маркировка – перспективное и динамично развивающееся технологическое направление. Прогресс в области электроники и программного обеспечения существенно повышает конкурентоспособность лазерных методов маркировки по сравнению с традиционными. Появление мощных лазеров новых типов позволяет создавать компактное оборудование, удобное для пользователя [15].

1.8. Выводы по первой главе

Проведенный анализ литературных источников показал, что цветная лазерная маркировка металлических поверхностей существенно расширяет возможности применения лазерной маркировки, однако разработки и рекомендации, выполненные в результате проведенных ранее исследований, не

дают однозначных ответов на вопросы о влиянии различных факторов на практические результаты цветной лазерной маркировки металлических поверхностей.

Таким образом, из приведенного выше анализа можно сделать следующие выводы.

1. Цветная лазерная маркировка – современный перспективный способ маркировки в процессе производства и эксплуатации в целях идентификации, учета, контроля качества и защиты от подделок полуфабрикатов и продукции в различных отраслях промышленности.

2. В настоящее время в области изучения и применения цветной лазерной маркировки металлических поверхностей остается ряд неизученных вопросов и теорий, требующих экспериментального подтверждения.

3. Результат лазерной цветной маркировки зависит от многих факторов. Для создания предсказуемых и стабильно воспроизводимых цветовых изображений на металлических поверхностях необходимо выявить степень влияния и взаимодействие этих факторов.

4. В результате выполнения диссертационной работы должно быть исследовано влияние ряда факторов на результаты ЦЛМ и, с учетом проведенных исследований, разработаны режимы ЦЛМ для получения цветового изображения на ряде металлических поверхностей.

Целью диссертационной работы является разработка режимов лазерной обработки металлической поверхности для создания управляемого формирования цветных изображений при заданной маркировке на основе изучения факторов активного влияния.

Для выполнения поставленной цели работы предполагается решить следующие задачи:

1. По заданной в программе траектории нанести на металлическую поверхность цветовые изображения, путем лазерной модификации небольшого слоя материала.

2. Осуществить выбор оборудования для проведения исследований.

3. Провести исследование влияния микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности на цветное окрашивание при лазерной маркировке.
4. Провести исследование влияния шероховатости поверхности металла, обработанного лазерным излучением, на ее цветное окрашивание.
5. Изучить фазовый состав пленок на поверхности металла при лазерной маркировке металлической поверхности.
6. Изучить состояние оксидных пленок на поверхности металла при лазерной маркировке металлической поверхности.
7. Изучить влияние теплофизических характеристик материала-подложки на формирование цветного изображения на материале-покрытии при лазерной маркировке.
8. Изучить влияния коэффициента перекрытия лазерных импульсов на формирование цветного изображения при маркировке металла.

ГЛАВА 2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Химический состав и свойства исследуемых материалов

Для проведения исследований выбраны металлические материалы с разными свойствами и теплофизическими характеристиками:

- сталь 12Х18Н10Т – при проведении собственных инновационных исследований можно опираться на ранее полученные другими исследователями сведения о маркировке этой стали;
- латунь Л63 – широко распространенный в промышленности металлический материал;
- сталь 08 с покрытием, нанесенным методом гальванического хромирования;
- 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.

Исследования микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности [16] разноокрашенных образцов, полученных путем изменения параметров лазерного излучения и исследования фазового состава и состояния оксидных пленок, образующихся на поверхности при лазерной маркировке в зависимости от параметров лазерного излучения проводили на пластинах из стали 12Х18Н10Т. Исходные пластины из стали 12Х18Н10Т представлены на рисунке 2.1. Химический состав материала пластин соответствует ГОСТ 5632–72 для сталей этого класса и приведена в таблице 2.1.

Основными легирующими элементами являются хром и никель. Высокое содержание обеспечивает способность металла к пассивации и обуславливает сильные антикоррозийные характеристики стали. Добавление никеля переводит сталь в класс аустенитов. Это свойство имеет исключительное значение,

позволяя сочетать технологичность нержавеющей стали с расширенным комплексом эксплуатационных характеристик. Такие стали хорошо прокатываются в холодном и горячем состоянии, обладают высокой, по сравнению с ферритными сталями, коррозионной устойчивостью в агрессивных средах, в том числе серной кислоте.

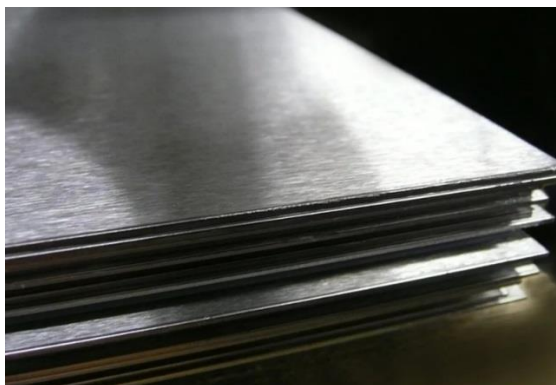


Рисунок 2.1 – Исходные пластины из стали 12Х18Н10Т

Таблица 2.1. – Химический состав исходных стальных пластин из сплава 12Х18Н10Т

Марка стали	Массовая доля элементов, % (не более)							
	C	Si	Mg	Cr	Ni	Ti	S	P
12Х18Н10Т	0,12	0,60	0,20	17,00- 19,00	9,00- 11,00	0,80	0,020	0,040

Помимо воздействия основных легирующих элементов следует учитывать наличие в сплаве титана, алюминия и кремния, которые добавляют ему ферритные свойства. Добавление в состав сильного карбидообразующего элемента – титана позволяет устранить склонность стали к межкристаллитной коррозии, который при реакции с углеродом образует тугоплавкий карбид TiC, исключая уменьшение концентрации в сплаве хрома (Cr) путем образования его карбидов. Добавление кремния увеличивает прочность материала и предел текучести, однако немного снижает пластичность, что затрудняет холодную прокатку. Марганец влияет на замедление скорости роста зерна, что

способствует получению мелкозернистой стали. Содержание фосфора не может превышать 0,035%. Этот показатель имеет критичное значение, так как данный вид стали используется в криогенной технике, а фосфор отрицательно влияет на механические свойства сплава.

Хром-никелевая сталь 12X18Н10Т занимает лидирующие позиции на рынке современного металлопроката. Благодаря своим уникальным качественным характеристикам сталь данной марки может использоваться в различных сферах производства и промышленности. Материал получил широкое применение в: пищевой промышленности – алкогольной, мясной, молочной; нефтяной промышленности; топливно-энергетическом секторе; химической промышленности; машиностроении.

Прокат из нержавеющей стали нашел свое применение во всех отраслях промышленности – от фармацевтической до авиационной. Данная продукция получила широкое применение в строительстве благодаря своим свойствам – инертности к агрессивным средам, износоустойчивости. По способу производства листовой прокат может быть горячим или холодным. В зависимости от сферы применения поверхность листа бывает гладкой или фактурной. Холоднокатаные листы могут иметь зеркальную, шлифованную или матовую поверхность. Горячекатаные листы бывают травленные и термообработанные. Из листовой стали формируется сортовой нержавеющей прокат, в который входит множество разновидностей изделий. Наиболее широкое распространение получили трубы. Помимо них из проката изготавливают прутки, ленту, проволоку [17].

При изучении влияния различия теплофизических характеристик материала-подложки на формирование цветового изображения на материале-покрытии при ЦЛМ изначально использованы пластины из углеродистой стали 08 и латуни Л63 (рисунок 2.2).

Сплав цинка и меди износоустойчив и хорошо подходит для изготовления подшипников, втулок, трубок и других движущихся и неподвижных деталей.

Будучи устойчивой к коррозии, она идеально работает в самых сложных условиях.

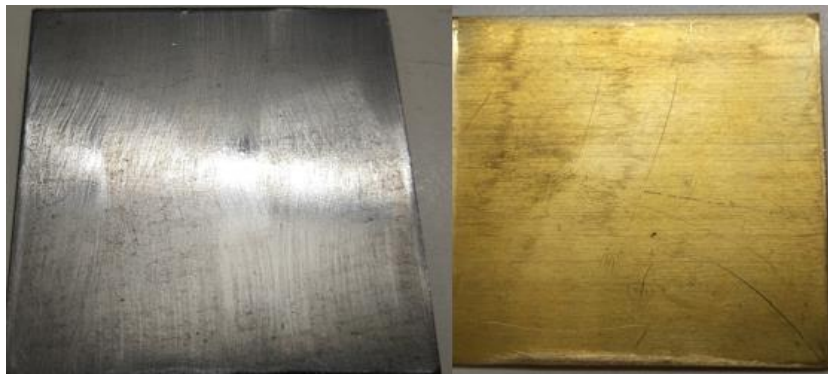


Рисунок 2.2 – Опытные пластины из стали 08 и латуни Л63 до хромирования

Сталь 08 – конструкционная углеродистая качественная сталь, поставляемая в виде фасонной и сортовой прокатной продукции, а так же в виде лент и листов. Используется для изготовления деталей, к которым предъявляются требования высокой пластичности. Данная сталь применяется для изготовления шайб, прутков, облицовки кузовов и других неответственных ненагруженных деталей. Область рабочих температур лежит в интервале от -40 до 450 °С.

Для применения данной стали в изготовлении неответственных деталей, к которым предъявляются требования высокой твердости поверхности, коррозионной стойкости и износостойкости, применяют химико-термическую обработку.

Хром прекрасно вступает в реакцию с кислотами, с серной и соляной. При взаимодействии с концентрированной азотной кислотой на поверхности хрома образуется нерастворимая оксидная пленка, данный процесс называется пассивацией хрома.

При взаимодействии с воздухом атмосферы не меняет своего цвета, так же покрываясь пассивной пленкой, которая препятствует дальнейшему разрушению металла. Хромовые покрытия не способны создавать с железом гальваническую пару и поэтому не могут электрохимически защищать железо. Хромовые покрытия защищают железо только механическим путем,

препятствуя проникновению кислорода атмосферы [18]. Химические составы данных образцов представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2. – Химический состав Стали 08 и латуни Л63

Химический состав стали 08, %		Химический состав Л63, %	
Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
C	0,05-0,12	Fe	до 0,2
Si	0,17-0,37	P	до 0,01
Mn	0,35-0,65	Cu	62-65
S	до 0,04	Pb	до 0,7
P	до 0,035	Zn	35-38
Cr	до 0,1	Sb	до 0,005
N	до 0,25	Bi	до 0,002
Cu	до 0,25	-	-
As	до 0,08	-	-

Хром представляет собой твёрдый и хрупкий металл, имеющий серебристо-стальной цвет с оттенком синего. Некоторые параметры данного материала приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. – Характеристики хрома

Параметры	Значение
Температура плавления	1940 °C
Удельный вес	6,5 г/м ³
Атомный вес	52
Валентность	6
Электрохимический эквивалент	0,323

2.2. Выбор устройства для цветной лазерной маркировки

Сверхактивное развитие современной промышленности зачастую стимулирует появление и новых технологических подходов, основанных на передовых научных разработках, направленных на расширение спектра и количества выпускаемой продукции. Удачным примером такого симбиоза требований производства с научными достижениями стала область лазерных технологий. Масса преимуществ с минимумом недостатков стали причиной повсеместного внедрения в сфере маркировки деталей, узлов и изделий оборудования, основой которого стали лазерные технологии.

В индустрии лазерной маркировки применяется широкая гамма лазерного оборудования, основанная на применении разных типов лазерных излучателей. Качество излучения, значительный рабочий ресурс и стабильность генерируемого светового потока обусловили самое широкое применение маркировочной аппаратуры на основе твердотельных лазеров. Промышленный маркиратор на базе твердотельного лазера изготавливается в различных факторах и в зависимости от требований производства может быть как компактным для гибкого применения в условиях производственного участка, так и стационарным с дополнительным оборудованием для маркировки серийных партий.

Волоконные лазеры, активно применяющиеся во многих лазерных системах маркировки, относятся к группе твердотельных лазеров, работают с длиной волны 1,064 мкм и позволяют добиваться на выходе высокой мощности луча. Оптоволоконный лазер генерирует энергию за счёт диодной накачки активной среды, в качестве которой выступает встроенное оптическое волокно.

Структура волоконного лазера состоит из трёхслойного оптоволоконна. У оболочки волокна показатель преломления наиболее низкий. Внутри оболочки находится внешний сердечник ядро с чуть большим показателем преломления. Эта разница заставляет свет на своём пути по волокну отражаться от внешнего сердечника. Свет, пересекающий внутренний сердечник, стимулирует

испускание лазерного света атомами иттербия, находящимися во внутреннем сердечнике, обладающим ещё большим показателем преломления [19].

Типовая схема подобного устройства состоит из трёх основных компонентов.

1. Модуль накачки. В качестве источника накачки оптических волноводов применяются широкополосные светодиоды или лазерные диоды с одномодовым излучением, обеспечивающие высокую яркость и большой ресурс выработки.

2. Активная среда. Состоит из активного оптоволокна и волновода накачки. Используются волоконные световоды, легированные добавками редкоземельных элементов или висмута. В качестве основного материала оптоволокна выступает сверхчистый плавленый кварц, обладающий минимальными оптическими потерями. Верхний предел мощности накачки подобного легированного кварца составляет единицы киловатт, который определяется предельной мощностью излучения на единицу площади, при которой материал не разрушается.

3. Оптический резонатор. Выполняет функции резонансной системы лазера и предназначен для создания положительной обратной оптической связи, за счёт которой лазерный усилитель превращается в лазерный генератор. Он фокусирует излучаемый активным веществом свет в один узкий пучок. Резонатор определяет спектр, поляризацию и направленность генерируемого излучения [20].

Области применения технологического оборудования для маркировки, оснащённые оптоволоконными лазерами, достаточно разнообразны: точная микрообработка различных материалов, нанесение графической маркировки, микрофрезеровка, нанесение надписей на приборных панелях, художественное структурирование поверхностей. Маркировочная табличка и шильдики, идентифицирующие штрих-коды, обработка тонких фольгированных материалов – всё это с легкостью подвластно аппаратуре на основе оптиковолоконных лазеров.

Устройства маркировки на базе волоконных лазерных излучателей успешно конкурируют с другими видами маркировки, как традиционными, так и на основе других типов лазеров.

Для нанесения цветного изображения на опытные металлические пластины, был использован импульсный волоконный лазер марки HansLaserMars модели 20J. Так как лазерные волоконные (*fiber*) граверы *L-Master* характеризуются высокой электрооптической конверсионной эффективностью, высокоскоростной системой сканирования, воздушным охлаждением, небольшими габаритами, высоким качеством выходного луча, высокой надежностью, длительным сроком службы и низким энергопотреблением. Серия ЛТК MARS включает два варианта исполнения — с источником 10 Вт и 20 Вт.

В работе оптимальным источником для нанесения цветного изображения было 20 Вт. Волоконный лазер HansLaserMars20J представленный на рисунке 2.3 имеет ряд преимуществ:

- отсутствие расходных материалов и необходимости в обслуживании;
- высокий КПД;
- простота в использовании;
- высокое качество излучения и надежность;
- отличное качество маркировки;
- низкое энергопотребление;
- срок службы лазера до 100 000 часов.

Отдельно стоит отметить возможность доукомплектации различными дополнительными устройствами, в т.ч.:

- защитная камера (повышения уровня безопасности до Класс I);
- ротационное устройство (обработка тел вращения);
- подвижный рабочий стол (манипулятор изделия).



Рисунок 2.3 – Импульсный волоконный лазер марки Hans Laser Mars

Характеристики данной модели представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. – Характеристики импульсного волоконного лазера

Наименование	Значение параметра
Центральная длина волны, нм	1064
Спектральная ширина линии, нм	30
Номинальная средняя выходная мощность, Вт	20
Длительность импульса на частоте 40 кГц, нс	120
Частота следования импульсов, кГц	20-100
Нестабильность пиковой мощности, %	5
Длина выходного волокна, м	3
Угловое смещение пучка, мрад	20
Линейное смещение пучка, мм	3
Напряжение питания, В	220
Габариты, ДхШхВ, мм	215 x 95 x 286
Вес, кг	8

Используемый в данной работе лазерный гравер работает совместно с программным обеспечением MarkingSoftware 6.0, которое установлено на индивидуальный компьютер. С помощью специальных программ MarkingSoftware 6.0 есть возможность задать необходимый режим лазерной обработки: геометрические параметры, длина и ширина маркируемого объекта, параметры лазерного излучения, скорость сканирования, перемещения лазерного луча, стратегия заливки (рисунок 2.4).

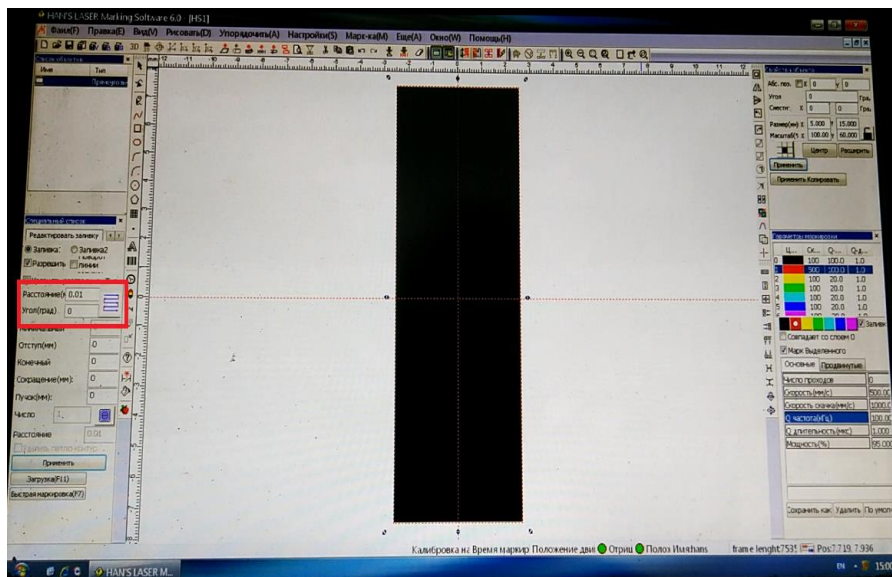


Рисунок 2.4 – Программное обеспечение MarkingSoftware 6.0

2.3. Создание образцов для проведения исследования

При создании образцов для исследования микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности разноокрашенных образцов, полученных путем изменения параметров лазерного излучения, использовали лазер волоконный иттербиевый, длина волны излучения -1,06 мкм; частота повторения импульсов до 100кГц, длительность импульсов -0,1 мкс, фокусное расстояние широкоаппаратурного объектива-160мм, перемещение луча осуществляется гальваносканером.

Для проведения тонких методов исследования фазового состава и состояния оксидных пленок, образующихся на поверхности нержавеющей стали при лазерной маркировке в зависимости от параметров лазерного излучения с помощью специального станка для раскроя листового металла отрезана пластина

из стали 12Х18Н10Т. Поверхность данной пластины отполирована с помощью УШМ – угловой шлифовальной машины, представленная на рисунке 2.5.



Рисунок 2.5 – Станок для раскроя листового металла

Полная таблица с заданными параметрами лазерного излучения для получения ЦЛМ на опытном образце из стали 12Х18Н10Т приведена в приложении А. Результаты, полученные при проведении анализа корреляции параметров лазерного излучения и зафиксированного цветового изображения приведены в таблице 2.5.

С помощью импульсного волоконного лазера с определенными режимами излучения (приложение 1) были обработаны зоны, размером 5х5 мм. Результат ЦЛМ представлен на рисунке 2.6.

ЦЛМ была так же проведена на другой опытной пластине, с измененными параметрами лазерного излучения. Все параметры представлены в приложении 2. Результат опыта – рисунок 2.7.

Для изучения влияния различия теплофизических характеристик материала-подложки на формирование цветового изображения на материале-покрытии при ЦЛМ изготовлены пластины материалов-подложек из стали 0,8 и латуни Л63 в форме квадратов со сторонами 60 мм.

Таблица 2.5. – Корреляция параметров лазерного излучения и зафиксированного цветового изображения поверхности пластины из стали 12Х18Н10Т

Энергия импульса, мДж	Скорость перемещения луча, мм/с	Расфокусировка ΔF , мм	Оценка контрастных групп полученного зафиксированного цветового изображения по шкале цветов RAL
Группа оттенков бежевого цвета			
0,5	2,0-2,4	0,2	RAL 7038 Серый агат
Группа оттенков розового цвета			
0,5	2,4-2,6	0,4	RAL 4002 Фиолетовый красный
Группа оттенков серого цвета			
0,5	2,6-3,0	0,6	RAL 7016 Серый антрацит

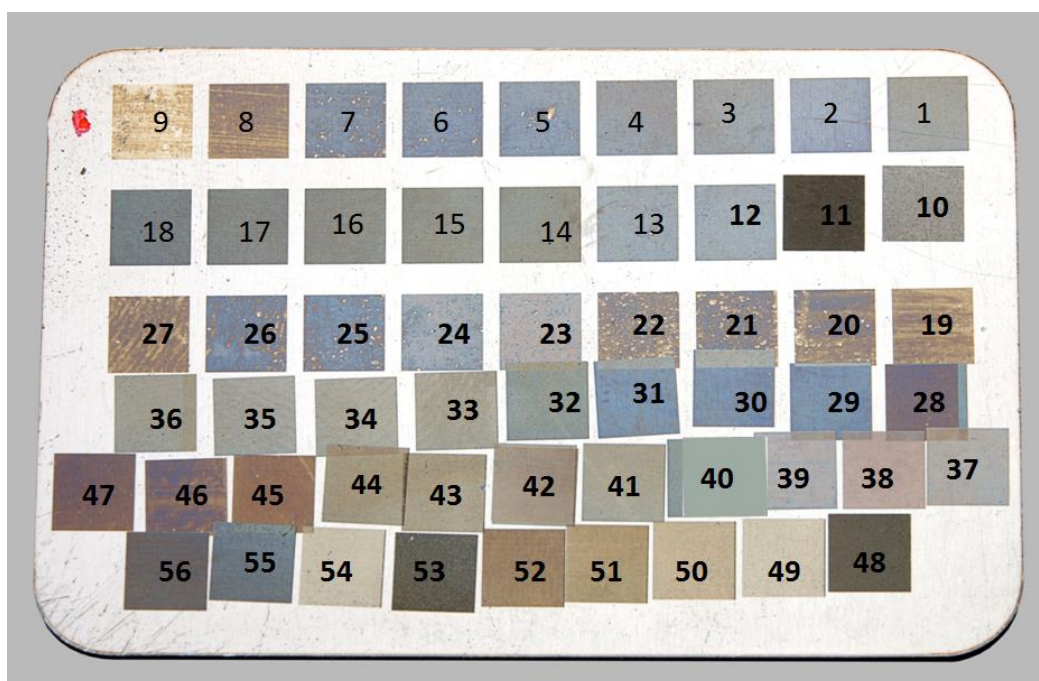


Рисунок 2.6 – Опытная пластина из стали 12ХН10Т



Рисунок 2.7 – Цветная лазерная маркировка на пластине с измененными параметрами

Перед нанесением цветового изображения с помощью лазерного маркера, пластины из стали 08 и латуни Л63 подвержены хромированию, путем опускания заготовок в гальваническую ванну. Необходимо на образцы нанести хром, толщиной 1 мкм. При операции гальваническое хромирование применялся анод из 94% свинца и 6% сурьмы [21]. Состав гальванической ванны представлен в таблице 6.

Таблица 2.6. – Состав гальванической ванны для хромирования образцов из стали 08 и латуни Л63

Состав ванны ГОСТ 9305-84	Содержание компонентов г/л
Ангидрид хромовый	200-250
Кислота серная	2-2,5

С целью уравнивания отражающей способности стали и латуни, опытные пластины подвергли хромированию толщиной 1 мкм, чтобы исключить

известное влияние этого фактора на получаемый в результате маркировки цвет.

Время нанесения покрытия определили по формуле Ямпольского А.М:

$$t = 1000 \times \frac{h \times \gamma}{C \times D_k \times \alpha}, \quad (1)$$

где h — толщина слоя хромового покрытия, мм; γ — удельный вес хрома, г/см³; C — электрохимический эквивалент, г/(А·час); α — выход хрома по току, %; D_k — плотность тока, А/дм².

Поверхность образца очищена от пыли и обезжирена. Время получения покрытия толщиной 1 мкм на обеих опытных пластинах составило 2 минуты.

Данные для расчета времени нанесения покрытия приведены в таблице 2.7, а схема гальванической ванны для хромирования представлена на рисунке 2.8.

Таблица 2.7. – Данные для расчета времени гальванического хромирования

Параметр	Обозначение	Значение
Толщина покрытия	h	1 мкм
Удельный вес хрома	γ	6,9—7,1 г/см ³
Электрохимический эквивалент	C	0,324 г/(А·час)
Выход хрома по току	α	12÷14%,
Плотность тока	D_k	5 А/дм ²

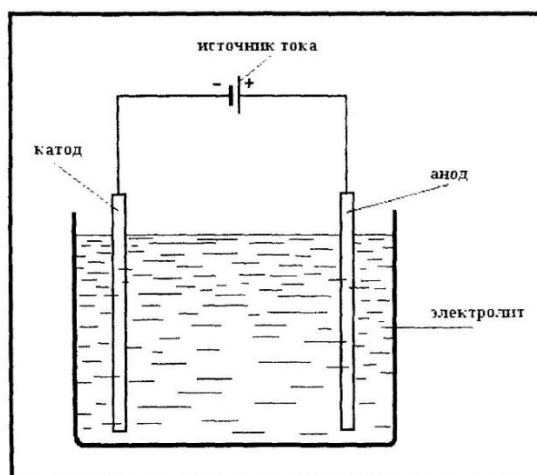


Рисунок 2.8. – Схема гальванической ванны

Обработанные хромом и готовые образцы для дальнейшего эксперимента представлены на рисунке 2.9.



Рисунок 2.9 – Образцы после операции хромирования

Для получения цветного изображения на поверхности хромированной латуни и стали использовали импульсный волоконный лазер марки HansLaserMars модели 20J.

В связи с тем, что лазерной обработкой хромированных покрытий с целью получения управляемого формирования цветом ранее не изучали, первоначально была проведена тестовая обработка [22]. С помощью тестовых проходов сформировалось понимание, какие параметры лазерного излучения необходимы для формирования цветового изображения и в каких диапазонах необходимо подвергать корректировку данных параметров для получения различных цветов. Результаты тестовой обработки пластин представлены на рисунке 2.10.



Рисунок 2.10 – Результаты тестовой обработки опытных хромированных пластин

По полученным данным в результате тестовой обработки, проведено нанесение надписи, задачей которого было получить цветное изображение надписи «73 дни науки» и надписи «НИТУ МИСИС». Результаты нанесения надписи представлены на рисунке 2.11. Высота букв 5 мм.



Рисунок 2.11 – Лазерная цветная маркировка хромистого покрытия на латунной и стальной пластинах

Параметры режимов лазерной обработки для нанесения цветной надписи, приведенного на рисунке 2.11 приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8. – Режим лазерной маркировки надписи

Расстояние между растрами, мм	Скорость прохода, мм/с	Число проходов	Мощность лазерного излучения, % (от 20Вт)	Частота импульсов, кГц	Величина расфокусировки	Материал
0,01	50	1	80	20	0	Сталь 08
0,01	50	1	80	20	0	Латунь Л63

После проведения тестовых проходов и надписи, на хромированной пластине из стали 0,8 был проведен эксперимент с целью получения воспроизводимых цветовых изображений при заданных параметрах лазерного излучения. Результаты и параметры этого эксперимента представлены на рисунке 2.12 и в таблице 2.9.



Рисунок 2.12 – Получение воспроизводимых цветовых изображений на хромированной поверхности стали 08

Таблица 2.9. – Параметры лазерного излучения для получения воспроизводимых цветовых изображений на стали 08

Ряд	Номер сегмента	Расстояние между растрами, мм	Скорость прохода мм/с	Число проходов, шт.	Мощность лазерного излучения, % (от 20Вт)	Частота импульсов, кГц
1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,01	100	2	25	20
	2	0,01	100	3	25	20
	3	0,01	50	1	25	20
	4	0,01	50	2	25	20
	5	0,01	50	3	25	20
	6	0,01	25	1	25	20
	7	0,01	25	2	25	20
	8	0,01	200	4	25	20
	9	0,01	200	10	30	20
2	1	0,01	100	2	30	20
	2	0,01	100	3	30	20
	3	0,01	50	1	30	20

Продолжение таблицы 2.9.

1	2	3	4	5	6	7
2	4	0,01	50	2	30	20
	5	0,01	50	3	30	20
	6	0,01	25	1	30	20
	7	0,01	25	2	30	20
	8	0,01	25	3	30	20
	9	0,01	200	4	30	20
	10	0,01	200	10	30	20
3	1	0,01	100	1	35	20
	2	0,01	100	2	35	20
	3	0,01	100	3	35	20
	4	0,01	50	1	35	20
	5	0,01	50	2	35	20
	6	0,01	50	3	35	20
	7	0,01	25	1	35	20
	8	0,01	25	2	35	20
	9	0,01	25	3	35	20
	10	0,01	200	4	35	20
4	1	0,01	100	1	40	20
	2	0,01	100	2	40	20
	3	0,01	100	3	40	20
	4	0,01	50	1	40	20
	5	0,01	50	2	40	20
	6	0,01	50	3	40	20
	7	0,01	25	1	40	20
	8	0,01	25	2	40	20
	9	0,01	25	3	40	20
	10	0,01	200	4	40	20
5	1	0,01	200	1	40	20
	2	0,01	200	2	40	20
	3	0,01	200	3	40	20
	4	0,01	300	1	40	20
	5	0,01	300	2	40	20
	6	0,01	300	3	40	20
	7	0,01	300	4	40	20
	8	0,01	500	1	40	20
	9	0,01	500	2	40	20
	10	0,01	500	3	40	20

2.4. Методы оценки цветowych изображений

При проведении исследований поверхности разноокрашенных образцов, полученных путем изменения параметров лазерного излучения для оценки полученных контрастных групп цветов в основу положен феноменологический метод исследования. Этот метод определяет задачу как беспредпосылочное описание опыта познающего сознания и выделение в нём сущностных черт [23].

Метод феноменологии. Феноменоло́гия (нем. Phänomenologie — учение о феноменах) — направление в философии XX века, определявшее свою задачу как беспредпосылочное описание опыта познающего сознания и выделение в нём сущностных черт.

Методами осуществления феноменологического исследования являются непосредственное созерцание (очевидность) и феноменологические редукции.

Непосредственное созерцание, как метод феноменологии, означает, что последняя является дескриптивной наукой, и её материалом служат исключительно данные непосредственной интуиции.

Феноменологические редукции делятся на три вида. Во-первых, чистая феноменология отвлекается от естественной установки, то есть наивной погружённости во внешний мир, и сосредоточивает внимание на самом акте (переживании) сознания, в котором мир нам даётся (феноменолого-психологическая редукция). Во-вторых, феноменология берёт эти переживания сознания не как конкретные факты, а как идеальные сущности (эйдетическая редукция). В-третьих, феноменология не останавливается на редукции к переживаниям сознания, и далее уже не только внешний мир, но и сферу душевного, сознание — как поток переживаний конкретного эмпирического субъекта — редуцирует к чистому сознанию (трансцендентальная редукция) [24].

Первым методическим принципом, критерием действительности чего-либо является очевидность. Необходимо установить первые очевидности, которые лягут в основу достоверного знания.

Итак, феноменология, отвлекаясь от существующего, рассматривает сущности — возможное, априорное в сознании.

Шкала цветов. Цвет — качественная субъективная характеристика электромагнитного излучения оптического диапазона, определяемая на основании возникающего физиологического зрительного ощущения и зависящая от ряда физических, физиологических и психологических факторов. Восприятие цвета определяется индивидуальностью человека, а также спектральным составом, цветовым и яркостным контрастом с окружающими источниками света, а также несветящимися объектами (рисунок 2.13.). Очень важны такие явления, как метамерия, индивидуальные наследственные особенности человеческого глаза (степень экспрессии полиморфных зрительных пигментов) и психики.

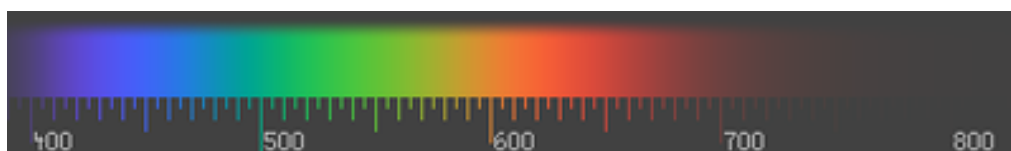


Рисунок 2.13 – Шкала цветов восприятия

Говоря простым языком, цвет — это ощущение, которое получает человек при попадании ему в глаз световых лучей. Одни и те же световые воздействия могут вызвать разные ощущения у разных людей. И для каждого из них цвет будет разным. Отсюда следует, что споры, «какой цвет на самом деле», бессмысленны, поскольку для каждого наблюдателя истинный цвет — тот, который видит он сам [25].

Непрерывный спектр цветов можно наблюдать на дифракционной решетке. Хорошей демонстрацией спектра является природное явление радуги.

Цвета спектра и основные цвета. Впервые непрерывный спектр на семь цветов разбил Исаак Ньютон (таблица 2.10.). Это разбиение условно и во многом случайно. Скорее всего, Ньютон находился под действием европейской нумерологии и основывался на аналогии с семью нотами в октаве (сравните: 7 металлов, 7 планет...), что и послужило причиной выделения именно семи

цветов. В XX веке Освальд Вирт предложил «октавную» систему (ввел 2 зелёных— холодный, морской и тёплый, травяной), но большого распространения она не нашла [26].

Таблица 2.10. – Связь цвета с параметрами светового излучения

Цвет	Диапазон длин волн, нм	Диапазон частот, ТГц	Диапазон энергии фотонов, эВ
Красный	625—740	405—480	1,68—1,98
Оранжевый	590—625	480—510	1,98—2,10
Жёлтый	565—590	510—530	2,10—2,19
Зелёный	500—565	530—600	2,19—2,48
Голубой	485—500	600—620	2,48—2,56
Синий	440—485	620—680	2,56—2,82
Фиолетовый	380—440	680—790	2,82—3,26

Заметно, что цвета спектра, начинаясь с красного и проходя через оттенки противоположные, контрастные красному (циан), затем переходят в фиолетовый цвет, снова приближающийся к красному. Такая близость видимого восприятия фиолетового и красного цветов связана с тем, что частоты, соответствующие фиолетовому спектру, приближаются к частотам, превышающим частоты красного ровно в два раза. Но сами эти последние указанные частоты находятся уже вне видимого спектра, поэтому мы не видим перехода от фиолетового снова к красному цвету.

Характеристики цвета. Каждый цвет обладает количественно измеряемыми физическими характеристиками (таблица 2.11).

- **Яркость.** Одинаково насыщенные оттенки, относимые к одному и тому же цвету спектра, могут отличаться друг от друга степенью яркости. К примеру, при уменьшении яркости синий цвет постепенно приближается к чёрному. Любой цвет при максимальном снижении яркости становится чёрным. Следует отметить, что яркость, как и прочие цветовые характеристики реального окрашенного объекта, значительно зависят от субъективных причин, обусловленных психологией восприятия.

- **Светлота.** Степень близости цвета к белому называют светлотой. Любой цвет при максимальном увеличении светлоты становится белым. Другое понятие светлоты относится не к конкретному цвету, а к оттенку спектра, тону. Цвета, имеющие различные тона при прочих равных характеристиках, воспринимаются нами с разной светлотой. Жёлтый тон сам по себе — самый светлый, а синий или сине-фиолетовый — самый тёмный.
- **Насыщенность** – степень отличия хроматического цвета от равного ему по светлоте ахроматического, «глубина» цвета. Два оттенка одного тона могут различаться степенью блёклости. При уменьшении насыщенности каждый хроматический цвет приближается к серому.
- **Цветовой тон** — характеристика цвета, отвечающая за его положение в спектре: любой хроматический цвет может быть отнесён к какому-либо определённому спектральному цвету. Оттенки, имеющие одно и то же положение в спектре (но различающиеся, например, насыщенностью и яркостью), принадлежат к одному и тому же тону. При изменении тона, к примеру, синего цвета в зеленую сторону спектра он сменяется голубым, в обратную— фиолетовым [25].

Таблица 2.11. – Физические характеристики света

Физическая характеристика	Яркость	Светлота	Насыщенность	Цветовой тон
Пример восприятия				

Иногда изменение цветового тона соотносят с «теплотой» цвета. Так, красные, оранжевые и жёлтые оттенки, как соответствующие огню и вызывающие соответствующие психофизиологические реакции, называют тёплыми тонами, голубые, синие и фиолетовые, как цвет воды и льда — холодными. Следует учесть, что восприятие «теплоты» цвета зависит как от субъективных психических и физиологических факторов (индивидуальные предпочтения, состояние наблюдателя, адаптация и др.), так и от объективных (наличие цветового фона и др.). Следует отличать физическую характеристику некоторых источников света — цветовую температуру от субъективного ощущения «теплоты» соответственного цвета. Цвет теплового излучения при повышении температуры проходит по «тёплым оттенкам» от красного через жёлтый к белому, но максимальную цветовую температуру имеет цвет циан.

Стандартизация в колориметрии обеспечивает максимальное подобие цветов, созданных различными способами и на разных носителях. Все участники технологического процесса должны иметь одинаковые эталоны в Цветовых атласах (или шкалах), использовать их для спецификации цветов и оттенков, ссылаясь на образцы, каждому из которых соответствует определенная формула смешения цветовых компонентов. Однако известные атласы не идентичны, имеют видимые даже на глаз цветовые различия. Это связано с погрешностями печатного процесса, выцветанием красок, истиранием и загрязнением эталонов, несоответствие используемого при окраске материала и материала эталонов. Суммарное различие цветов между атласами может достигать 6-10 dE.

Атлас цветов (колориметрический атлас, цветовой каталог) — систематизированный набор образцов цвета. Различные атласы, а также цветовые шкалы, широко используются в колориметрии для визуального определения и стандартизации исследуемого цвета с помощью сравнения исследуемого образца с цветами эталонов, систематизированных и определённым образом закодированных в атласе. Атлас обычно выполняют из разноокрашенных образцов. Нередко параллельно изготавливают эталоны с блестящей и матовой поверхностью, реже - ещё и структурированной. Сравнение

исследуемого образца и эталонов производится в условиях идентичного освещения. Из-за метамерии всё равно возможны ошибки идентификации, если только не обусловить заранее вид источника цвета (цветовая температура и полная спектральная характеристика) [27].

Цветовые шкалы используются для визуализации в самых разнообразных задачах.

При исследовании микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности разноокрашенных образцов, полученных путем изменения параметров лазерного излучения и при исследовании фазового состава и состояния оксидных пленок, образующихся на поверхности нержавеющей стали для оценки полученных контрастных групп цветов использовали шкалу цветов RAL.

Стандарт RAL был представлен в 1927 году Немецким Институтом Гарантий Качества и Сертификации. Институт установил стандарт на цветовое пространство, разделив его на диапазоны и обозначив каждый цвет однозначным цифровым индексом.

RAL — германский цветовой стандарт, разработанный в 1927 году Государственным комитетом по условиям поставок (нем. Reichsausschuß für Lieferbedingungen und Gütesicherung) по просьбе производителей лакокрасочной продукции.

Институт установил стандарт на цветовое пространство, разделив его на диапазоны и обозначив каждый цвет однозначным цифровым индексом. С тех пор компания RAL постоянно разрабатывает и добавляет новые образцы цветов, в соответствии с потребностями растущего рынка. Многочисленные нотации, сопровождающие примеры цветов, гарантируют ясное и лаконичное средство коммуникации, которое понятно во многих областях промышленности. Разработанная универсальная система выбора цветов востребована практически во всех отраслях, где нужно правильное понимание цвета.

RAL" является сокращенным обозначением (аббревиатурой) полного названия "Reich Ausschluß für Lieferbedingungen" - Имперского Управления

Германии по торговым стандартам (Института Гарантий Качества и Сертификации), образованного в Берлине в 1925 году.

Классическая цветовая коллекция RAL, ставшая стандартом для выбора цвета с 1927 года. Теперь серия включает 213 цветов, в том числе 17 металликов. Номера четырехзначные, (№XXXX) где 1xxx — жёлтые (30 штук), 2xxx — оранжевые (13 штук), 3xxx — красные (25 штук), 4xxx — фиолетовые (12 штук), 5xxx — синие (25 штук), 6xxx — зелёные (36 штук), 7xxx — серые (48 штук), 8xxx — коричневые (20 штук), 9xxx — светлые и тёмные (14 штук), количество оттенков указано включая металлики. Классические цвета RAL нашли широкое применение в различных областях промышленности [28].

Сегодня стандарт RAL включает в себя несколько тысяч цветов и оттенков. На рисунке 2.14 приведены лишь наиболее часто используемые цвета.

При изучении цветов, полученных в результате лазерной маркировки хромистых гальванических покрытий углеродистой стали 08 и латуни Л63 использовали шкалу цветов NCS.

NCS - система естественных цветов, предложенная 1952 году Скандинавским Институтом Цвета. Система NCS считается самой совершенной моделью восприятия цвета человеком [29].

Система обычно используется для описания и сопоставления цветов, а не смешивания цветов. NCS — единственная система, описывающая цвет так, как мы его видим, поэтому она понятна, логична и проста в использовании.

RAL 1000 Зелено-бежевый	RAL 1001 Бежевый	RAL 1002 Желтый песок	RAL 1003 Бледно-желтый	RAL 1004 Золотисто-желтый	RAL 1005 Желтый мед	RAL 1006 Желтая кукуруза	RAL 1007 Желтый нарцисс
RAL 1011 Коричнево-бежевый	RAL 1012 Желтый лимон	RAL 1013 Белая устрица	RAL 1014 Слоновая кость	RAL 1015 Лепный слоновый	RAL 1016 Серо-желтый	RAL 1017 Желтый шафран	RAL 1018 Желтый цинк
RAL 1019 Серо-бежевый	RAL 1020 Желтая маслина	RAL 1021 Ярко-желтый	RAL 1023 Желтый глубокий	RAL 1024 Желтая охра	RAL 1027 Желтое карри	RAL 1028 Желтая дыня	RAL 1032 Яично-желтый
RAL 1033 Желтый георгин	RAL 1034 Желтая пастель	RAL 2000 Желто-оранжевый	RAL 2001 Красно-оранжевый	RAL 2002 Ярко-красный	RAL 2003 Оранжевая пастель	RAL 2004 Чистый оранжевый	RAL 2008 Яркий красно-оранжевый
RAL 2009 Оранжевый глубокий	RAL 2010 Бледно-оранжевый	RAL 2011 Оранжевый	RAL 2012 Оранжевый лосось	RAL 3000 Красное пламя	RAL 3001 Красный	RAL 3002 Пунцово-красный	RAL 3003 Красный рубин
RAL 3004 Фиолетово-красный	RAL 3005 Красное вино	RAL 3007 Черно-красный	RAL 3009 Красная окись	RAL 3011 Коричнево-красный	RAL 3012 Бежево-красный	RAL 3013 Красный томат	RAL 3014 Старая роза
RAL 3015 Лепкий розовый	RAL 3016 Красный коралл	RAL 3017 Роза	RAL 3018 Красная земляника	RAL 3020 Красный насыщенный	RAL 3022 Красный лосось	RAL 3027 Красная малина	RAL 3031 Красный восточный
RAL 4001 Красная сирень	RAL 4002 Фиолетово-красный	RAL 4003 Фиолетовый вереск	RAL 4004 Фиолетовый кларет	RAL 4005 Синяя сирень	RAL 4006 Фиолетовый насыщенный	RAL 4007 Фиолетово-пурпурный	RAL 4008 Фиолетовый
RAL 4009 Фиолетовая пастель	RAL 5000 Фиолетово-синий	RAL 5001 Зелено-синий	RAL 5002 Ультрамарин	RAL 5003 Синий сапфир	RAL 5004 Черно-синий	RAL 5005 Синий насыщенный	RAL 5007 Бриллиантово-синий
RAL 5008 Серо-синий	RAL 5009 Сине-голубой	RAL 5010 Синий	RAL 5011 Синяя сталь	RAL 5012 Лепкий синий	RAL 5013 Синий кобальт	RAL 5014 Синяя птица	RAL 5015 Синее небо
RAL 5017 Бледно-синий	RAL 5018 Бирюзово-синий	RAL 5019 Синий капри	RAL 5020 Синий океан	RAL 5021 Синяя вода	RAL 5022 Синяя ночь	RAL 5023 Глубокий голубой	RAL 5024 Синяя пастель
RAL 6000 Зеленый воск	RAL 6001 Зеленый изумруд	RAL 6002 Зеленый лист	RAL 6003 Зеленая маслина	RAL 6004 Сине-зеленый	RAL 6005 Зеленый мох	RAL 6006 Серая маслина	RAL 6007 Бутыльно-зеленый
RAL 6008 Коричнево-зеленый	RAL 6009 Зеленая ель	RAL 6010 Зеленая трава	RAL 6011 Зеленая резеда	RAL 6012 Черно-зеленый	RAL 6013 Зеленый тростник	RAL 6014 Желтая маслина	RAL 6015 Черная маслина
RAL 6016 Бирюзово-зеленый	RAL 6017 Зеленый	RAL 6018 Желто-зеленый	RAL 6019 Зеленая пастель	RAL 6020 Зеленый хром	RAL 6021 Бледно-зеленый	RAL 6022 Серая маслина	RAL 6024 Зеленый насыщенный
RAL 6025 Зеленый папоротник	RAL 6026 Зеленый опал	RAL 6027 Лепкий зеленый	RAL 6028 Зеленая сосна	RAL 6029 Зеленая мята	RAL 6032 Бледно-зеленый	RAL 6033 Бирюзовая мята	RAL 6034 Бирюзовая пастель
RAL 7000 Серая белка	RAL 7001 Серое серебро	RAL 7002 Серая маслина	RAL 7003 Серый мох	RAL 7004 Серый	RAL 7005 Мышиный	RAL 7006 Серо-бежевый	RAL 7008 Хаки серый
RAL 7009 Серо-зеленый	RAL 7010 Серый брезент	RAL 7011 Серое железо	RAL 7012 Серый базальт	RAL 7013 Темно-серый	RAL 7015 Серый шифер	RAL 7016 Серый антрацит	RAL 7021 Серо-черный
RAL 7022 Серый земляной	RAL 7023 Серый бетон	RAL 7024 Серый графит	RAL 7026 Серый гранит	RAL 7030 Серый камень	RAL 7031 Серо-голубой	RAL 7032 Серая галька	RAL 7033 Серый цемент
RAL 7034 Серо-желтый	RAL 7035 Серый графит	RAL 7036 Серая платина	RAL 7037 Серая пыль	RAL 7038 Серый агат	RAL 7039 Серый кварц	RAL 7040 Серое стекло	RAL 7042 Серый глубокий А
RAL 7043 Серый глубокий В	RAL 7044 Серый шелк	RAL 7046 Серый группа 2	RAL 8000 Зелено-коричневый	RAL 8001 Коричневая охра	RAL 8002 Коричневый	RAL 8003 Коричневая глина	RAL 8004 Коричневая медь
RAL 8007 Коричневый олень	RAL 8008 Коричневая оливка	RAL 8011 Коричневый орех	RAL 8012 Красно-коричневый	RAL 8014 Коричневая сепия	RAL 8015 Коричневый каштан	RAL 8016 Коричнево-красное дерево	RAL 8017 Коричневый шоколад
RAL 8019 Серо-коричневый	RAL 8022 Черно-коричневый	RAL 8023 Оранжево-коричневый	RAL 8024 Бежево-коричневый	RAL 8025 Бледно-коричневый	RAL 8028 Коричневая земля	RAL 9001 Сливочно-белый	RAL 9002 Серо-белый
RAL 9003 Белый	RAL 9004 Черный	RAL 9005 Черный темный	RAL 9010 Чистый белый	RAL 9011 Черный графит	RAL 9016 Ярко-белый	RAL 9017 Черный глубокий	RAL 9018 Белый папирус

Рисунок 2.14 – Цветовая шкала RAL

Система позволяет дать точное описание каждому из миллиона цветов. Расшифровка кода цвета происходит следующим образом. Если представить систему в виде трехмерной модели вид сверху будет выглядеть как на рисунке 2.15. На расстояниях максимально равноудаленных от центра находятся самые насыщенные цвета. В точках пересечения осевых линий с окружностью находятся основные хроматические цвета. В системе NCS для их обозначения используют начальные английские буквы в названии каждого цвета. Это Желтый (Yellow), Зеленый (Green), Красный (Red), Синий (Blue). Сочетание двух соседних цветов дают промежуточный цвет, например сочетание красного и синего дают фиолетовый цвет, а красного и желтого – оранжевый цвет.

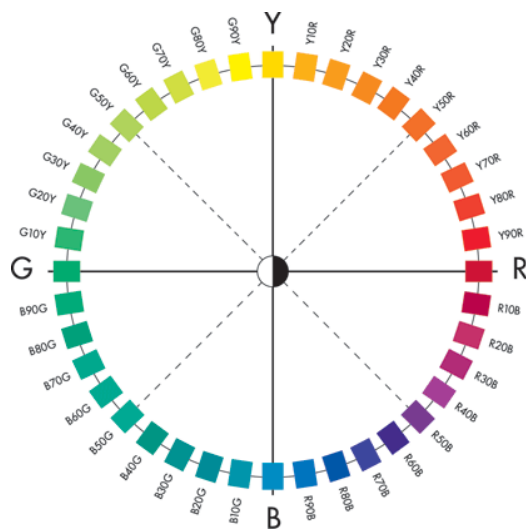


Рисунок 2.15 – Базовые цвета системы

Половина вида с боку будет выглядеть, как представлено на рисунке 2.16. По вертикальной оси, которая одновременно является центром окружности и основанием треугольника WCS, определяется содержание в цвете белой (White) и черной (Shadow) составляющей, другими словами его темнота или белизна. В коде цвета учитывается чернота в процентном соотношении.

По горизонтальной оси определяется насыщенность самого цвета. Чем ближе к центру, тем менее насыщенный цвет, удаляясь от центра его насыщенность возрастает. Максимальная насыщенность располагается в вершине треугольника WCS. Так, например, максимально желтый цвет находится в точке Y

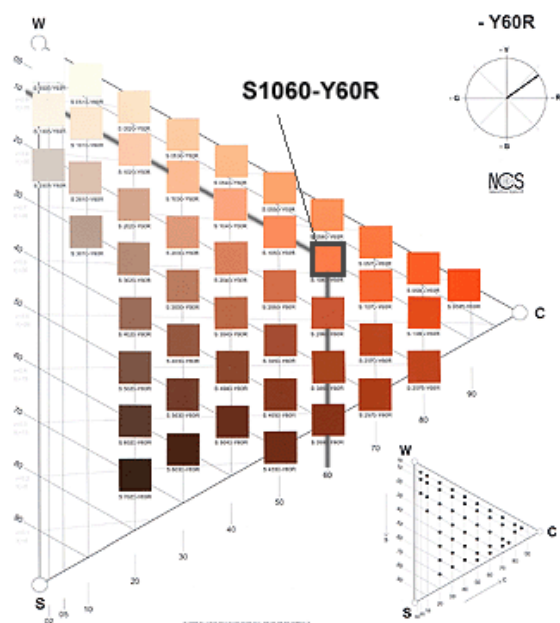


Рисунок 2.16 – Треугольник системы NCS

Совмещая круг и треугольник получаем трехмерную модель представленную на рисунке 2.17.

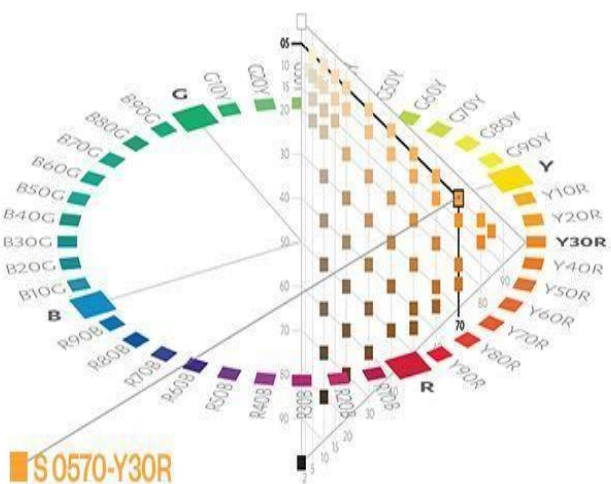


Рисунок 2.17 – Положение оранжевого цвета в системе NCS

На примере оранжевого цвета с кодом S 0570-Y30R разберем значение элементов кода. S – стандартNCS, 05 – означает что 5 % данного цвета составляет черный цвет, т.е. темнота цвета 5 %, 70 – указывает на насыщенность цвета (Chromatics), т.е. насыщенность цвета составляет 70 % от максимального. Y30 [30].

Наглядно в полном объеме цветовая модель NCS представлена на рисунке 2.18 в виде двойного конуса.

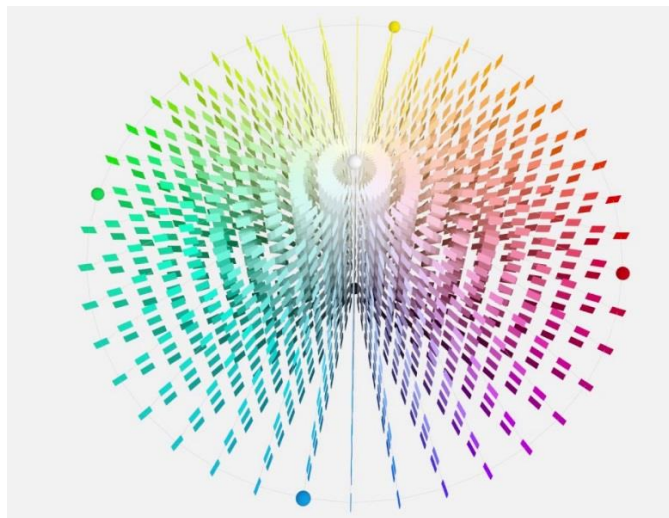


Рисунок 2.18 – Трехмерная модель NCS

Трехмерная модель цвета NCS наглядно показывает, что местонахождение каждого цвета имеет координаты. Поэтому данный способ идентификации цветового изображения, можно будет применить при программировании лазерной установки, для нанесения определенной гаммы цветов.

2.5. Оборудование и методы исследования влияния микрогеометрии сложного регулярного микрорельефа поверхности образцов обработанных лазерным излучением на формирование цветового изображения

С помощью микроскопа Axio Observer D1m зафиксированы цветовые изображения микроструктур. Микроскоп Axio Observer произведен в немецкой фирме CarlZeiss. Может функционировать в различных режимах: ручном (A1), кодируемом (D1) - использованном в данной работе и моторизованном (M1). Главное достоинство данного микроскопа – значительная мощность светового потока в области изучаемого объекта, позволяющая получать четкое реалистичное изображение. Инвертированный экспериментальный микроскоп

Axio Observer D1m - микроскоп плоского поля, в котором рабочая плоскость располагается над объективом. Для данного исследования этот микроскоп выбран потому, что наиболее точно воспроизводит при фиксации, наблюдаемый визуально цвет исследуемых образцов (рисунок 2.19).

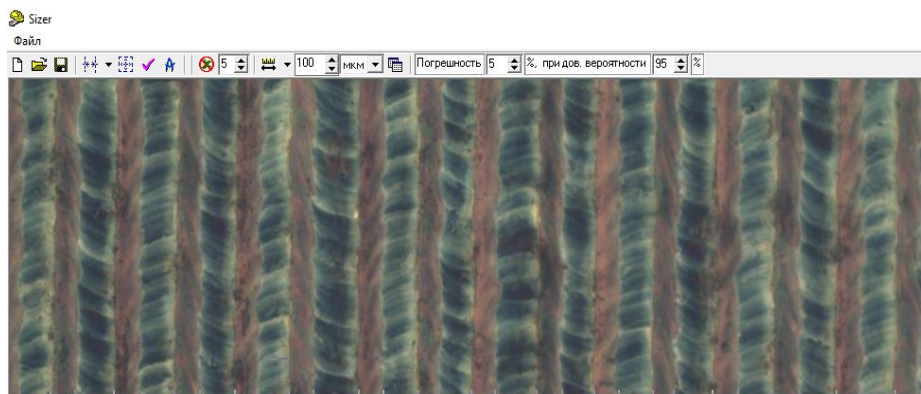


Рисунок 2.19 – Регулярный микрорельеф на поверхности металла после цветной лазерной маркировки

Этот же микроскоп использовали для изучения микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности, обработанной лазерным излучением металлографическим методом секущих.

Метод секущих – способ количественной металлографии, с помощью которого можно определить, в числе прочих, геометрические размеры структурных составляющих в плоскости наблюдения. При этом фиксируют количество пересечений секущей линии с границами структурных составляющих. Этот метод использован для определения ширин элементов регулярного микрорельефа на поверхности металла после цветной лазерной маркировки с применением различных параметров.

Метод секущих реализован с помощью программы Sizer, позволяющей компьютеризировать осуществление замеров и получение результатов.

Обработку результатов замеров осуществляли с применением методов математической статистики. Среднее значение замеров находили согласно формуле [31]:

$$\bar{X} = \frac{X_1 + \dots + X_{10}}{10}, \quad (2)$$

где X – замер металлографического элемента.

Среднее квадратичное отклонение определяли по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (3)$$

где $n = 10$ – число замеров.

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

Для дополнения сведений о микрогеометрии поверхности разноокрашенных образцов (определение глубины неровностей) проводили исследования с помощью бесконтактного светового профилометра VICWU, анализируя изображение уровней поверхности, сформированное устройством из набора интерференционных изображений.

Для контроля и измерения неровности поверхности введен такой термин как шероховатость.

Шероховатость – параметр учитывающий соотношение неровности поверхности с относительно небольшими шагами к единичной величине длины (рисунок 2.20).

На данном рисунке параметр l – это базовая длина, на которой определяется отклонение. Параметром m обозначается средняя линия. Sm и Si – параметры характеризующие средний шаг местных выступов и неровностей профиля. H_{imax} и H_{imin} – отклонение максимумов и минимумов от средней величины. Параметры $himin$ и $himin$ – расстояние от пяти наивысших и низших максимумов и минимумов, до параллельной не пересекающей профиль линии. R_{max} – параметр наибольшей высоты профиля, y_i – отклонение от линии m , b – размер отрезков, отсеченных на уровне p . Таким образом, параметр Rz — является суммой усредненных абсолютной высоты пяти самых больших выступов поверхности и абсолютной глубины пяти самых больших впадин в пределах базового расстояния [32].

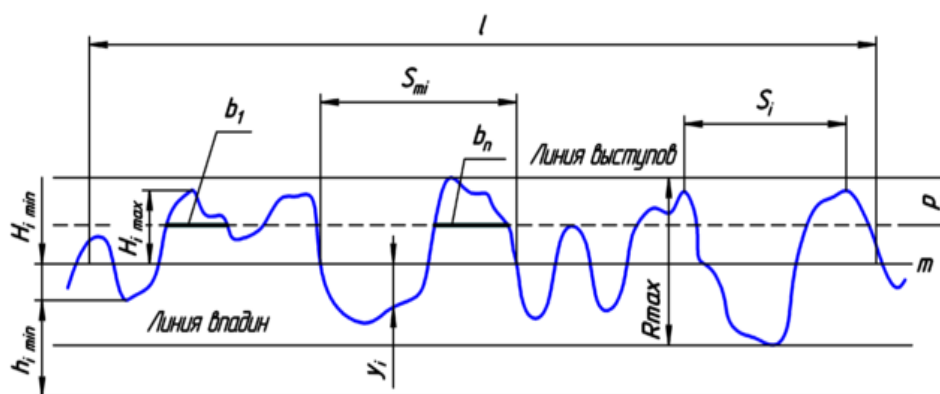


Рисунок 2.20 – Шероховатость поверхности

В работах, посвященных исследованиям оптических свойств в зависимости от шероховатости поверхности, на которую падает световая волна изучались составляющие сопоставимые с размером длин волн. Установлено что отражение света носит диффузный характер, он рассеивается по всем направлениям в случае неупорядоченного расположения неровностей (единичных площадок шероховатости). Состояние такой поверхности с оптической точки зрения характеризуется как матовое. При со направленности единичных площадок шероховатости возникает направленное отражение световых волн, если подавляющее количество неровности со направлены наблюдается повышенные отражательные характеристики, свет фокусируется и наблюдается такое оптическое явление как блеск. Таким образом, доля отраженного в главном направлении света повышается пропорционально количеству единичных площадок расположенных одинаково к главному направлению.

Исследования характера отраженного от поверхностей света занимались в своих работах Р. Kubelka, F. Munk, Duntley S. и др. [33].

По характеру отражения света от покрытия отраженный свет разделяют на 3 группы отражающих поверхностей: матовую гляцевую и зеркальную [34].

Покрытие, у которого высота неровностей не превышает половины длины волны видимого света называются зеркальными. При падении на такую поверхность свет практически не рассеивается.

Глянцевые поверхности в той или иной степени искажают падающий на них свет.

Матовая поверхность наиболее сильно искажает падающий свет, разбивает его по различным направлениям

2.6 Оборудование и методы исследования влияния режимов лазерной обработки на фазовый состав и трещинообразование в оксидных пленках, образующихся на поверхности нержавеющей стали

Фазовый состав поверхности изучаемых образцов исследовали с помощью устройства рентгеновского дифрактометра фирмы Rigaku (рисунок 2.21).

Рентгеновский дифрактометр — прибор, определяющий интенсивность и направление рентгеновского излучения, которое дифрагирует на исследуемом объекте, имеющем кристаллическую структуру. Он измеряет интенсивность, направление излучения и углы дифракции с большой точностью. На этом приборе исследуют монокристаллические, поликристаллические объекты, текстуры и множество других веществ в различных условиях. Этот метод исследования называется «рентгеновский структурный анализ», так как он наблюдает структуру веществ и объектов, на которых рассеивается рентгеновское излучение. Методы рентгеновского структурного анализа различаются в зависимости от свойств, состояния изучаемого образца и объема получаемой информации [35].



Рисунок 2.21 – Многофункциональный рентгеновский дифрактометр
RigakuSmartLab

При оценки окисных пленок, использовали метод анализа тонких пленок в геометрии скользящего пучка. Один из способов, позволяющих избежать интенсивного сигнала от подложки и получить сильный сигнал от пленки, является выполнение сканирования с фиксированным скользящим углом падения. Фиксированный угол, как правило, выбирается чуть выше критического угла полного отражения материала пленки.

Многофункциональный рентгеновский дифрактометр RigakuSmartLab объединил в себе самые передовые разработки в области рентгеновской дифракции, высокий уровень автоматизации, а так же полностью модульную конструкцию. Система оснащена вертикальным гониометром высокого разрешения с горизонтально расположенным столом, оптикой перекрестных лучей (CBO оптика), In-plane геометрией, и 9 кВт источником излучения с вращающимся анодом.

Для изучения влияния режимов лазерной обработки на трещинообразование в оксидных пленках на поверхности образцов при увеличениях до $\times 7000$ использовали электронный микроскоп TESCAN VEGA3 SB. Это сканирующий электронный микроскоп, который содержит традиционный вольфрамовый термокатод целиком управляем от портативного компьютера. Характерными преимуществами электронного микроскопа считаются: отличные оптические качества, фиксация изображения и получение

цифрового высококачественного изображения с значительным разрешением, новейший интерфейс программы, огромный подбор форматов при сохранении изображений.

Характеристики многофункционального рентгеновского дифрактометр RigakuSmartLab представлены в таблице 2.12.

Таблица 2.12. - Технические характеристики многофункционального рентгеновского дифрактометра RigakuSmartLab

Характеристика	Значение
Рентгеновская трубка	Cu, Fe, Cr, Mo, мощность 1,5–2,5 кВт
Мощность генератора	3 кВт
Геометрия гониометра	Вертикальный, Тета–Тета
Радиус гониометра	185–285 мм
Минимальный шаг 2 Тета	0,0001°
Щели расходимости	Автоматические до 20 мм
Юстировка рентгеновской оптики	Автоматическая

2.7. Оборудование для изучения влияния различия теплофизических характеристик материала-подложки на формирование цветового изображения на материале-покрытии при ЦЛМ

Исследование поверхности опытных образцов производили с помощью микроскопа UnionVersamed 2 (рисунок 2.22).

Данный микроскоп позволяет делать увеличение от 50 до 1000 раз. В микроскоп интегрирована фотокамера Canon EOS 5D Mark III. Данная камера имеет размер матрицы 22,3-мегапикселя, что позволяет получать снимки микроструктуры образцов высокой чёткости. Данный фотоаппарат работает совместно с программным обеспечением, с помощью которого снимки выводятся на экран монитора. Данная установка удобна тем, что можно

регулировать настройки микроскопа и они в режиме реального времени будут отображаться на мониторе. Для калибровки увеличения и построения линейки на изображении данный микроскоп комплектуется калибратором, пластиной с нанесенной шкалой. Шаг данной шкалы составляет 10 мкм. Длина самой шкалы составляет 1 мм. Чтобы определить масштаб изображений, данная пластина устанавливается перед необходимой линзой микроскопа. Создается фото шкалы. В итоге получаются одинаковые размеры кадров, что дает возможность перенести шкалу на изображение микроструктуры для оценки масштаба [36].



Рисунок 2.22 – Микроскоп UnionVersamed 2

Идентификация цветов полученных при лазерной обработке поверхности металлических пластин с покрытием гальванического хрома производилось по зафиксированному с помощью записывающего оптического устройства изображению. Фиксация изображения производилась с помощью модуля Sony IMX378 имеющего размер матрицы 12 мегапикселей. Данный модуль встроен в мобильное устройство Xiaomi Mi 5S оболочкой программного обеспечения MIUI 9. Модуль камеры оснащен цифровой стабилизацией обеспечивающей высокое качество снимков. Фиксация изображения производилась под прямым углом при дневном освещении.

2.8 Выводы по второй главе

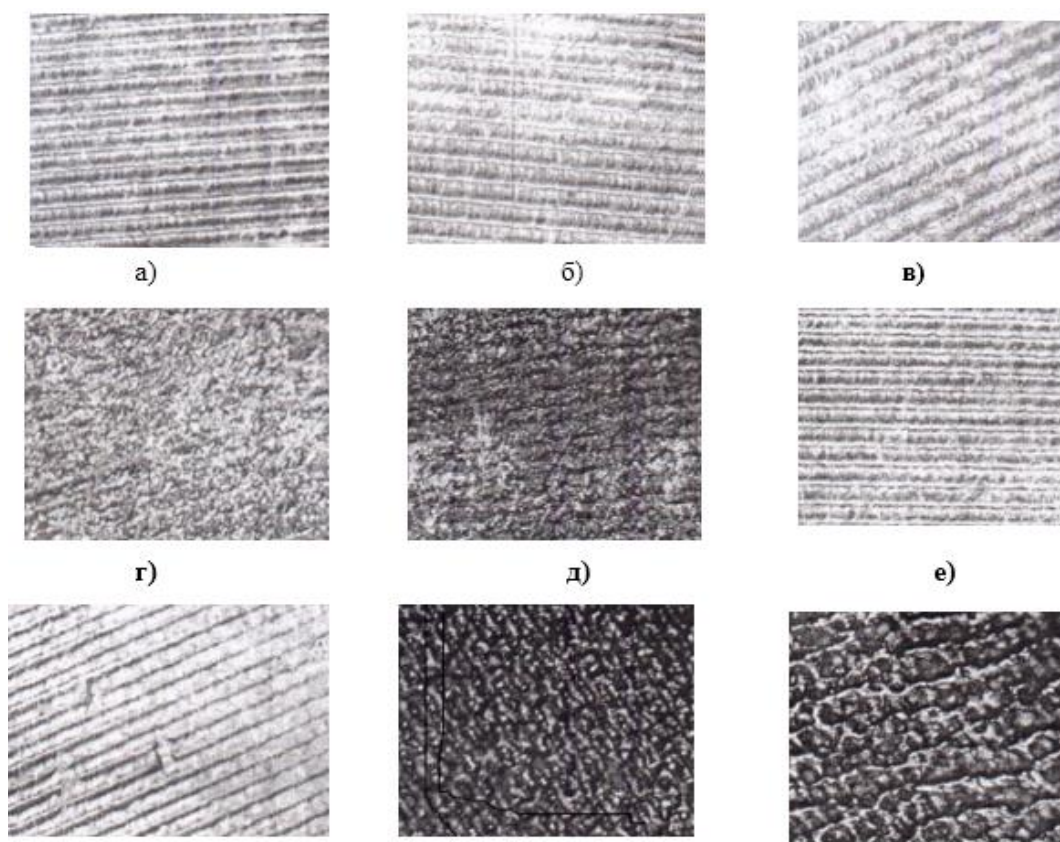
1. Определены и мотивированы объекты и методики исследований.
2. Осуществлен выбор оборудования для нанесения цветowych изображений способом ЦЛМ на поверхность нержавеющей стали и на хромистое гальваническое покрытие, нанесенное на углеродистую сталь и латунь
3. С помощью ЦЛМ созданы образцы для изучения влияния:
 - микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности на цветное окрашивание при лазерной маркировке;
 - шероховатости поверхности металла, обработанного лазерным излучением, на ее цветное окрашивание;
 - фазового состава пленок на поверхности металла при ЦЛМ;
 - параметров ЦЛМ на трещинообразование в окисных пленках, образующихся на поверхности металла в результате ЦЛМ;
 - влияния различия теплофизических характеристик материала-подложки на формирование цветного изображения на материале-покрытии при ЦЛМ.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ СЛОЖНОГО РЕГУЛЯРНОГО РЕЛЬЕФА, ФАЗОВОГО СОСТАВА И СОСТОЯНИЯ ОКСИДНЫХ ПЛЕНОК НА ПОВЕРХНОСТИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ЦВЕТНОЙ МАРКИРОВКЕ

3.1. Микрогеометрия сложного регулярного рельефа, образующегося на металлических поверхностях при ЦЛМ

При лазерном воздействии на поверхности металла формируется сложный периодический микрорельеф. Из анализа снимков, полученных с помощью зондового микроскопа учеными Антоновым Д.Н., Бурцевым А.А. и Бутковским О.Я., следует, что при маркировке на поверхности образуются углубления шириной порядка 35 мкм, возникающие под воздействием луча лазера. Расстояние между бороздами порядка 12 мкм, а глубина 0,3...0,8 мкм (в зависимости от полученного цвета). Кроме того, в результате воздействия лазерного луча образуется сложный микрорельеф высотой 0.5...1.2 мкм, являющийся следствием кипения металла. По мнению вышеупомянутых исследователей это указывает на возможность влияния многих факторов на формирование цвета поверхности металла при лазерной маркировке. Следовательно, микрогеометрия сложного периодического поверхностного рельефа может оказывать значительное влияние на зрительное восприятие цветообразования, полученного в результате лазерной маркировки и требует более глубокого исследования. Для оценки этого влияния нужен не только приблизительно оценочный, но системный подход. Поэтому проведен целый ряд экспериментов для определения влияния ширины и глубины микронеровностей поверхности, модифицированной лазерным облучением с различными параметрами, на цветообразование на поверхности нержавеющей стали [37].

Наличие сложного регулярного рельефа на поверхности стали в ряде случаев было зафиксировано и при проведении данной работы. Металлографическое изображение с увеличением $\times 200$ наиболее характерных образцов предназначенных для исследования микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности разноокрашенных фрагментов, расположенных на поверхности исследуемой пластины из стали X18H10T, представлены на рисунке 3.1. Нумерация образцов и режимы соответствующей им лазерной обработки представлены в главе 2.



а - образец №1; б – образец №4; в – образец №7; г – образец №10;
 д – образец №11; е – образец №14; ж – образец №40; з – образец №48;
 и – образец №53

Рисунок 3.1 – Металлографическое изображение наиболее характерных образцов при увеличении $\times 200$

У большей части цветных фрагментов наблюдали чередование зон лазерного воздействия (ЗЛВ) и зон термического влияния (ЗТВ). Однако регулярный рельеф при $\times 200$ наблюдали не во всех случаях. Изучение микрорельефа ряда образцов оказалось невозможным вследствие размытости границ ЗЛВ и ЗТВ. При параметрах лазерного излучения свойственных этим образцам создается картина, не подлежащая в данном случае анализу.

3.2. Металлографическое исследование микрогеометрии рельефа, полученного в результате лазерного излучения на поверхности образцов

С целью выявления влияния размеров металлографических элементов (в данном случае ширины ЗЛВ и ЗТВ) изученных образцов на их окрашивание при ЦЛМ, методом секущих были проведены замеры этих элементов с дальнейшей статистической обработкой полученных результатов. Полная таблица результатов представлена в приложении В.

Все полученные цветные изображения на поверхности металлов были оценены с помощью шкалы цветов RAL и поделены на контрастные группы. Для визуализации обработки статистических данных были выбраны образцы с наиболее ярким проявлением группового цветового оттеночного признака и собраны в три контрастные группы.

Результаты расчетов и измерений для этих трех контрастных групп в зависимости от размеров элементов на исследуемых поверхностях (ЗЛВ и ЗТВ) с учетом доверительных интервалов измерений представлены в таблице 3.1.

Результаты указывают на то, что 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 12Х18Н10Т, которая имеет одинаковую по всей поверхности одинаковую структуру и шероховатость.

Таблица 3.1. – 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

Представленную информацию в таблице можно наглядно проанализировать на диаграммах, представленных на рисунке 3.2.

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.

Показатели шероховатости (R_z и R_a) исследуемых поверхностей измеряли на допустимо небольших площадях, при этом базовые линии выбирали таким образом, чтобы учесть влияние волнообразности поверхности на показатели шероховатости R_z и R_a .

Для исследования подобраны образцы из группы красного и зеленого цветов по шкале RAL, полученные при использовании лазерного излучения, параметры которого представлены в таблице 3.2. Полученные параметры шероховатости исследованных образцов представлены в таблице 3.3. [38].

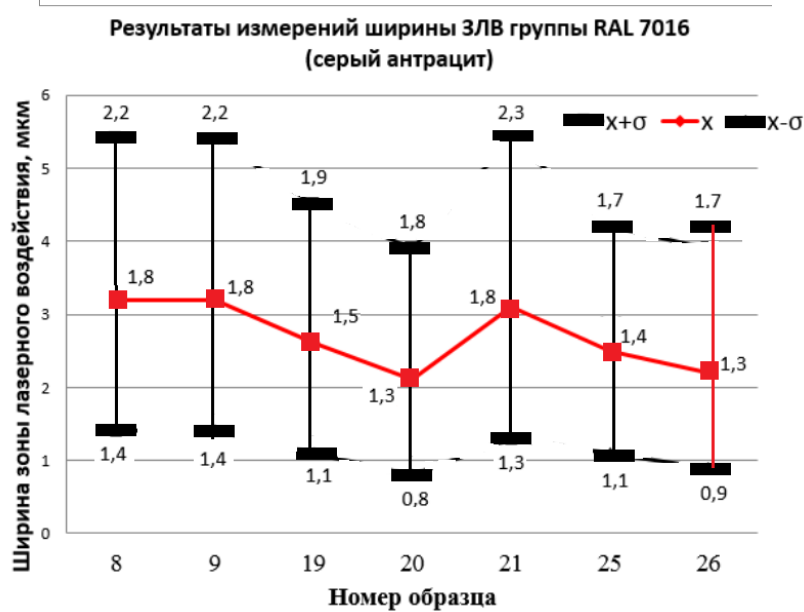
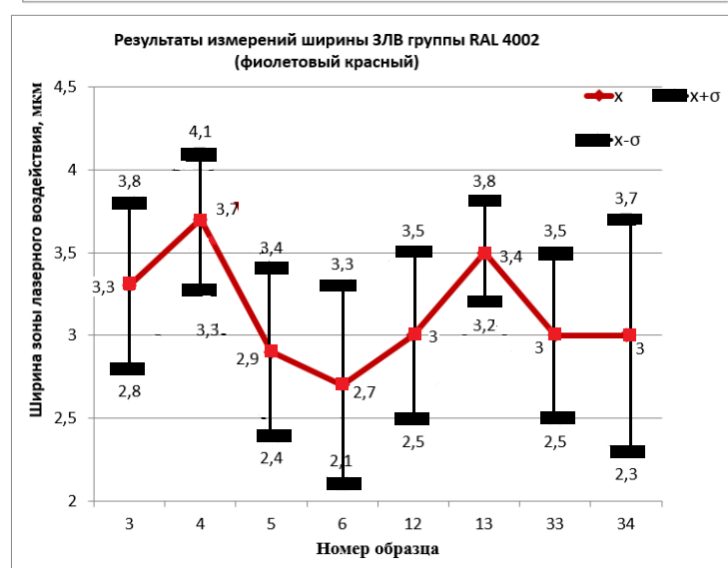
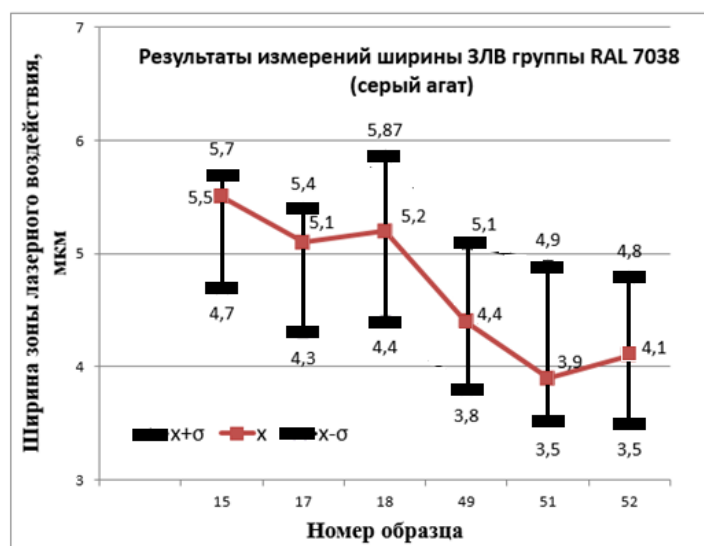


Рисунок 28 – Результаты измерений ширины ЗЛВ контрастных групп

Таблица 3.2. - Маркировка образцов для определения параметров шероховатости

Параметры лазерного излучения	Группа и цвет образца	
	ГруппаRAL 3020 красный насыщенный	ГруппаRAL 3020 зеленый лист
f – частота следования импульсов, кГц	50	50
P – мощность лазерного излучения средняя, Вт	60	60
L – расстояние между проходами луча, мм	0,005	0,005
V – скорость продвижения луча, мм/с	400	400
N – количество проходов.	1	2

Таблица 3.3. - Результаты измерения шероховатости образцов

Группа и цвет образца	Параметр шероховатости поверхности, мкм	
	R_a	R_z
ГруппаRAL 3020 зеленый лист	0,261 ± 0,001	3,063 ± 0,393
ГруппаRAL 3020 красный насыщенный	0,167 ± 0,002	1,870 ± 0,247

Профилограмма исследованных участков поверхности исследуемой области, полученная бесконтактным методом представлена на рисунке 3.3.

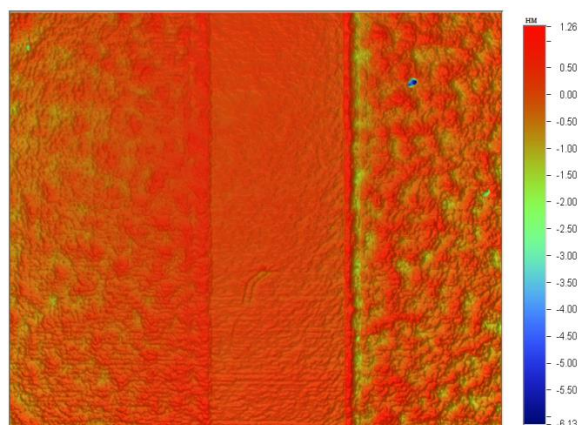


Рисунок 3.3 – Профилограмма поверхности исследуемой области

Показано, что изменение показателей шероховатости поверхности R_a и R_z в 1,5 раза вследствие изменения режима лазерной обработки поверхности, изменяет окрашивание поверхности (в данном случае имеют место красный и зеленый цвета).

Исследования регулярных рельефов поверхности, образующихся в результате лазерной маркировки с различными параметрами, показали влияние микрогеометрии этих рельефов на зрительное восприятие окрашивания.

Это подтверждает гипотезу Антоновым Д.Н. и др. о том, что идентификация с помощью зрения цветов на поверхности металлов, обработанных лазерным излучением, связана не только с интерференцией в тонких пленках, но и может быть результатом влияния других факторов (например – дифракции). Таким образом, установлено влияние микрогеометрии поверхности, как одного из факторов, определяющих зрительное восприятие цветового изображения, полученного при маркировке металлической поверхности.

В подтверждение вышеизложенного проведено металлографическое исследование при увеличении $\times 200$ образцов, полученных при режимах ЦЛМ с различным расстоянием L между проходами луча и различным количеством проходов луча N (таблица 3.4.) [38].

Исследование показало, что на поверхности нержавеющей стали сформированы различные контрастные группы, соответствующие заданным режимам с хорошо различимой разницей в микрогеометрии рельефа (таблица 3.5, рисунок 3.4).

Это подтверждает гипотезу, высказанную Антоновым Д.Н. и др. о том, что визуальное цветообразование связано не только с явлением цветов побежалости и интерференцией в тонких пленках, но и может являться результатом дифракции. Таким образом, установлено влияние микрогеометрии поверхности, как одного из факторов, определяющих зрительное восприятие цветового изображения, полученного при маркировке металлической поверхности.

Таблица 3.4. - Параметры лазерного излучения, использованные для получения определенных контрастных групп RAL с целью проведения металлографического исследования образцов из 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 – частота следования импульсов, кГц	50	20	100	100
P – мощность лазерного излучения средняя, Вт	60	35	80	80
L – расстояние между проходами луча, мм	0,005	0,01	0,03	0,005
V – скорость продвижения луча, мм/с	500	300	300	400
N – количество проходов	2	1	1	1

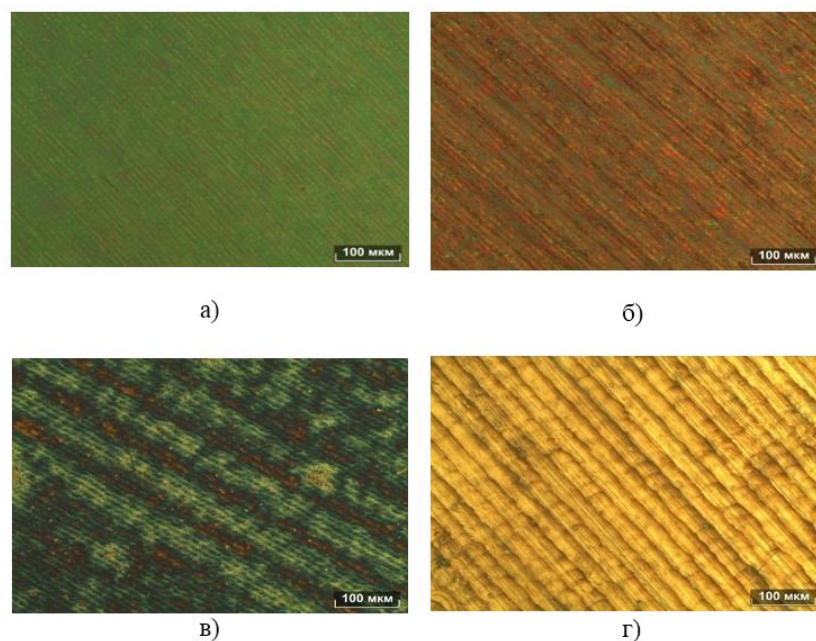
Таблица 3.5. – Результаты измерений и расчетов ширины ЗЛВ и ЗТВ

№ образца	ЗЛВ		ЗТВ	
	$\bar{X}$	σ	$\bar{X}$	σ
RAL 6025 Зеленый папоротник	2,262	0,059	35,997	0,811
RAL 6012 Черно-зеленый	4,803	0,343	33,185	0,396
3 RAL 1004 Золотисто-желтый	4,156	0,215	34,821	0,444
RAL 2001 Красно-оранжевый	3,309	0,187	34,502	0,393

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

кузовных элементов. Для применения этих возможностей определены режимы лазерного излучения для термического воздействия на поверхность стали 12X18H10T при получении цветов, соответствующих ряду контрастных групп по шкале RAL на поверхностях из стали и установленные режимы лазерной обработки позволяющие избежать появления трещин в оксидных пленках на поверхности стали 12X18H10T.



а – образец Зеленый папоротник (группа RAL 6025); б – образец Красно-оранжевый (группа RAL 2001); в – образец Черно-зеленый (группа RAL 6012);
г – образец Золотисто-желтый (группа RAL 1004)

Рисунок 3.4. – Структура поверхности разноокрашенных образцов. $\times 200$

3.3. Результаты качественного рентгеноспектрального анализа поверхности стали, обработанной лазерным излучением

В настоящее время нет единого мнения о фазовом составе оксидных пленок, образующихся на поверхности металлов в результате лазерной обработки, даже для идентично окрашенных на поверхности одного металла. Поэтому определение соответствия фазового состава оксидных пленок определенному цветообразованию представляет и научный и практический интерес [39].

Фазовый состав поверхности образцов изучали, используя рентгеновский дифрактометр Rigaku способом анализа тонких пленок в геометрии скользящего пучка. Исследование проводили на образцах Зеленый папоротник (группа RAL 6025); Красно-оранжевый (группа RAL 2001); Черно-зеленый (группа RAL 6012); Золотисто-желтый (группа RAL 1004). Параметры лазерного излучения, использованные для получения этих контрастных групп RAL.

Также практическое значение имеет и чисто механическое состояние оксидной пленки: ее качество тем стабильнее, чем выше ее сплошность. В работе предпринята попытка выявления факторов, влияющих на трещинообразование в оксидных пленках при лазерной маркировке.

Фазовый и химический состав поверхности разноокрашенных образцов изучали, используя рентгеновский дифрактометр Rigaku, методом анализа тонких пленок в геометрии скользящего пучка. Результаты исследования представлены в таблицах 3.6. – 3.9 и на рисунках 3.5.-3.8).

Таблица 3.6. – Результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025)

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. Detail	DB card number	Content (%)
Tetrataenite	Fe Ni	123: P4/mmm	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-071-8321	29.0(4)
Magnetite	Fe ₃ O ₄	227: Fd- 3m,choice-2	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-076-7165	56.1(13)
Iron, syn	Fe	229: Im-3m	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-087-0722	15.0(5)

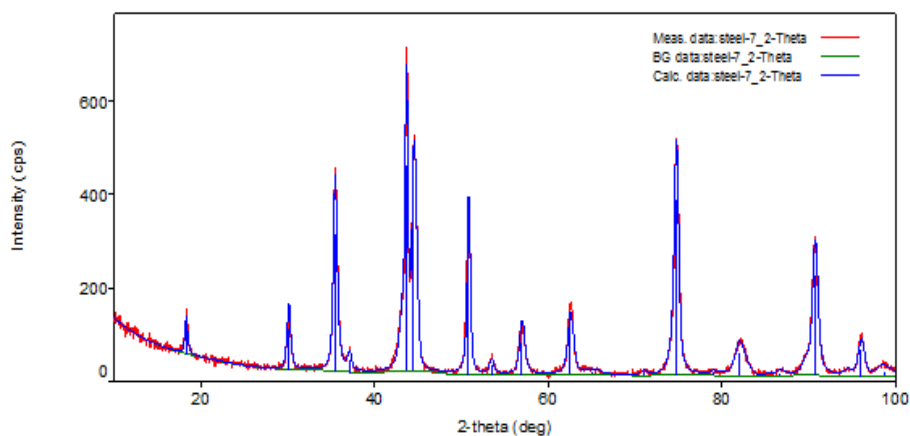


Рисунок 3.5 – Графические результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025)

Таблица 3.7. – Результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета Красно-оранжевый (группа RAL 2001)

Phase	Space group	Phase reg. detail	DB card number	Content (%)
(Fe Cr Ni)	225:Fm-3m	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-071-7594	52(2)
Ni _{0.4} Fe _{2.6} O ₄	227:Fd-3m,choice-2	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-087-2335	39.6(10)
Fe	229:Im-3m	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-071-3763	8.5(17)

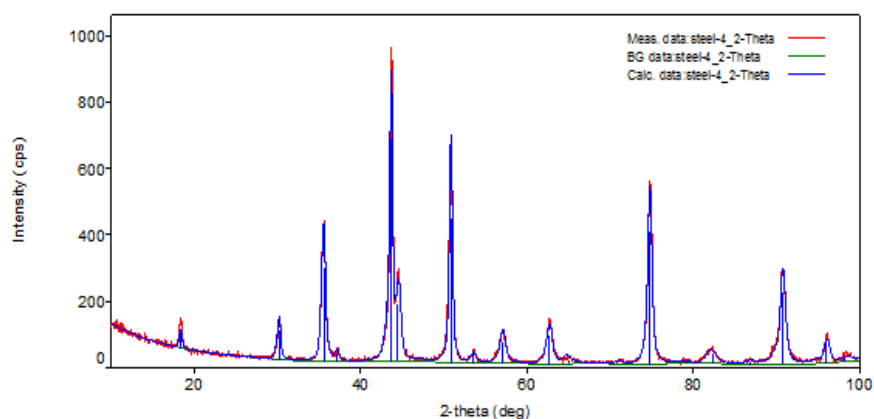


Рисунок 3.6 – Графические результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета Красно-оранжевый (группа RAL 2001)

Таблица 3.8. – Результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета Черно-зеленый (группа RAL 6012)

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number	Content (%)
Chromium Nickel	(Cr Ni)	225:Fm-3m	ICDD (PDF-2/ Release 2012 RDB)	01-071-7594	83.2(3)
Magnetite, syn	Fe (Fe ₂ O ₄)	227: Fd-3m,choice-2	ICDD (PDF-2/ Release 2012 RDB)	01-075-9710	14.8(3)
Iron	Fe	229:Im-3m	ICDD (PDF-2/ Release 2012 RDB)	01-071-3763	2.0(5)

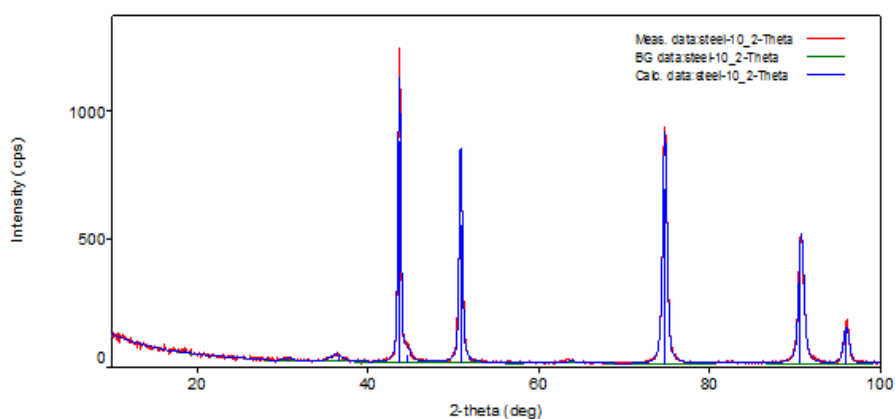


Рисунок 3.7 – Графические результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета Черно-зеленый (группа RAL 6012)

Таблица 3.9. – Результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета Золотисто-желтый (группа RAL 1004)

Phase name	Formula	Space group	Phase reg. detail	DB card number	Content (%)
Chromium Nickel	(Cr Ni)	225: Fm-3m	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-071-7594	83.1(2)
Iron, syn	Fe	229: Im-3m	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-087-0722	3.8(3)
iron diiron(III) oxide, Magnetite	Fe ₃ O ₄	57: Pmca	ICDD (PDF-2/Release 2012 RDB)	01-076-0956	13.1(4)

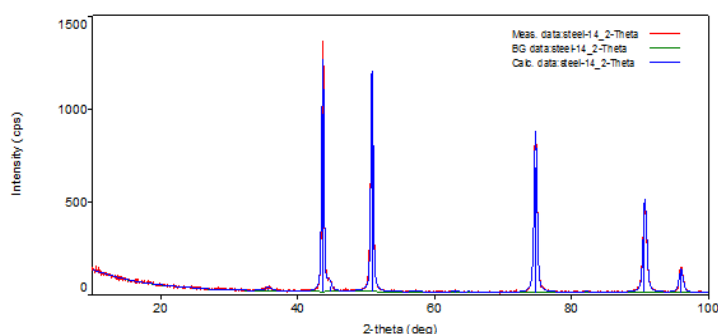


Рисунок 3.8 – Графические Результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета Золотисто-желтый (группа RAL 1004)

На рисунке 3.9. показана микроструктура образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025) с расположением точек исследования поверхности образца.

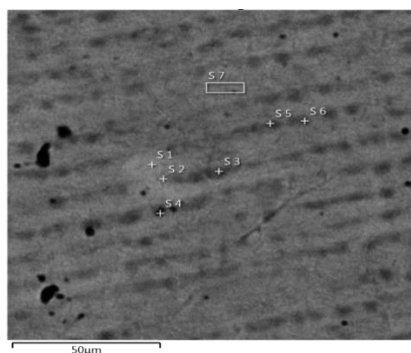


Рисунок 35 – Микроструктура образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025) с расположением точек исследования поверхности образца

На рисунке 3.10 показана спектрограмма химического состава исследуемых точек №№ S1 – S7, исследуемого образца.

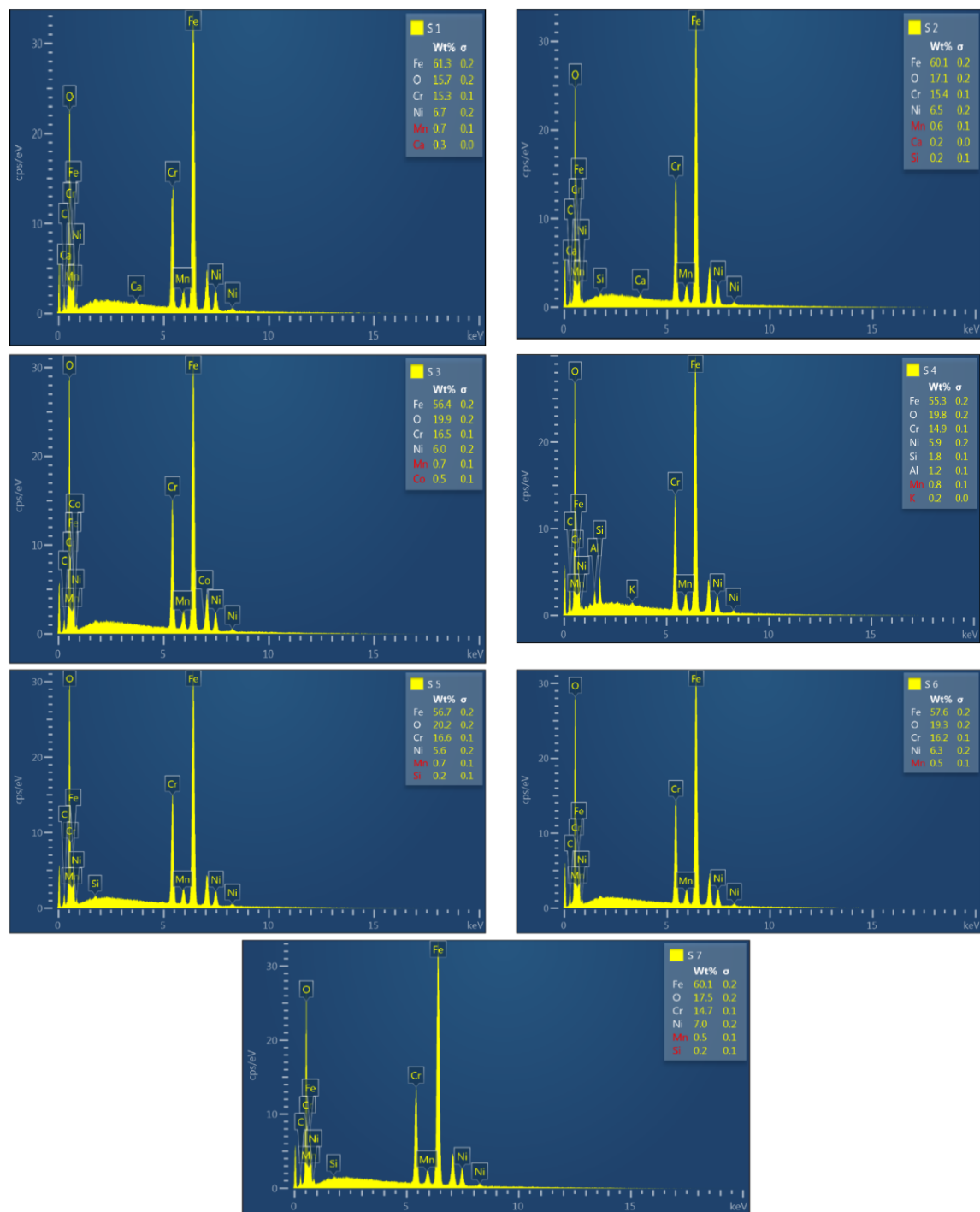


Рисунок 3.10. – Спектрограмма химического состава исследуемых точек №S1-S7 при изучении поверхности образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025)

Далее в работе представлены результаты качественного анализа при изучении поверхности образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025). Химический состав семи точек исследования поверхности образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025) представлен в таблице 23.

Таблица 3.10. – Химический состав в % WT и в % AT точек исследования поверхности образца цвета «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025)

Total table % WT											
Спектральная точка	O	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Total
S 1	15.68				0.26	15.33	0.73	61.28		6.72	100
S 2	17.08		0.15		0.22	15.4	0.59	60.09		6.46	100
S 3	19.92					16.47	0.7	56.41	0.5	6.03	100
S 4	19.75	1.2	1.81	0.18		14.93	0.84	55.35		5.94	100
S 5	20.21		0.16			16.59	0.72	56.69		5.62	100
S 6	19.34					16.24	0.54	57.59		6.29	100
S 7	17.45		0.22			14.71	0.55	60.09		6.98	100
Total table % AT											
Спектральная точка	O	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Total
S 1	39.09				0.26	11.76	0.53	43.78		4.57	100
S 2	41.51		0.21		0.22	11.52	0.42	41.84		4.28	100
S 3	46.19					11.75	0.47	37.48	0.3	3.81	100
S 4	45.01	1.62	2.36	0.16		10.47	0.56	36.13		3.69	100
S 5	46.58		0.22			11.76	0.48	37.43		3.53	100
S 6	45.29					11.7	0.37	38.63		4.01	100
S 7	42.18		0.3			10.94	0.39	41.6		4.6	100

На рисунке 3.11 показана микроструктура образца цвета Красно-оранжевый (группа RAL 2001) и расположение точек исследования на поверхности стали. На рисунке 3.12 представлена спектрограмма химического состава точек № S1 – S8 при изучении поверхности образца Красно-оранжевый (группа RAL 2001).

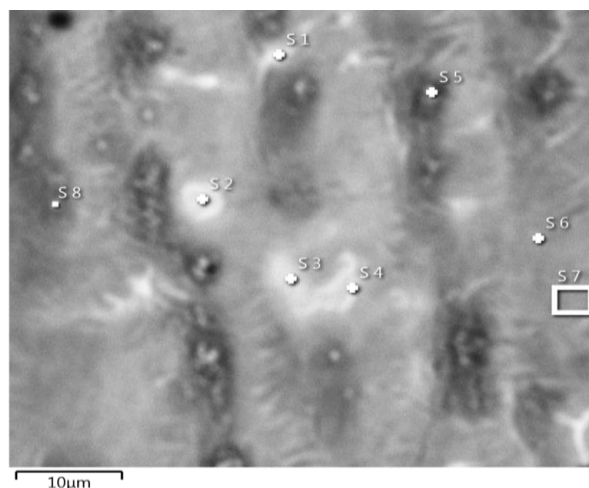


Рисунок 3.11 – Микроструктура образца цвета Красно-оранжевый (группа RAL 2001)

Химический состав точек исследования поверхности образца цвета Красно-оранжевый (группа RAL 2001) представлен в таблице 3.11.

Таблица 3.11. - Химический состав в % WTi в % AT точек исследования поверхности образца Красно-оранжевый (группа RAL 2001)

Total table % WT.											
Спектральная точка	O	Si	S	V	Cr	Mn	Fe	Ni		Total	
S 1	6.81	0.37			13.73	0.64	69.83	8.61		100	
S 2	4.62	0.37			14.86	0.64	70.93	8.58		100	
S 3	5.53	0.35	0.28		15.43	0.87	69.25	8.29		100	
S 4	7.3	0.37	0.25		16.53	0.93	66.73	7.88		100	
S 5	16.5			0.18	18.67	0.57	56.37	7.73		100	
S 6	15.8	0.28			17.9	0.83	58.41	6.78		100	
S 7	16.49				19.01	0.85	57.16	6.49		100	
S 8	18.2				20.5	0.82	54.06	6.42		100	
Total table % AT											
Спектральная точка	O	Al	Si	K	Ca	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Total
S 1	39.09				0.26	11.76	0.53	43.78		4.57	100
S 2	41.51		0.21		0.22	11.52	0.42	41.84		4.28	100
S 3	46.19					11.75	0.47	37.48	0.3	3.81	100
S 4	45.01	1.62	2.36	0.16		10.47	0.56	36.13		3.69	100
S 5	46.58		0.22			11.76	0.48	37.43		3.53	100
S 6	45.29					11.7	0.37	38.63		4.01	100
S 7	42.18		0.3			10.94	0.39	41.6		4.6	100

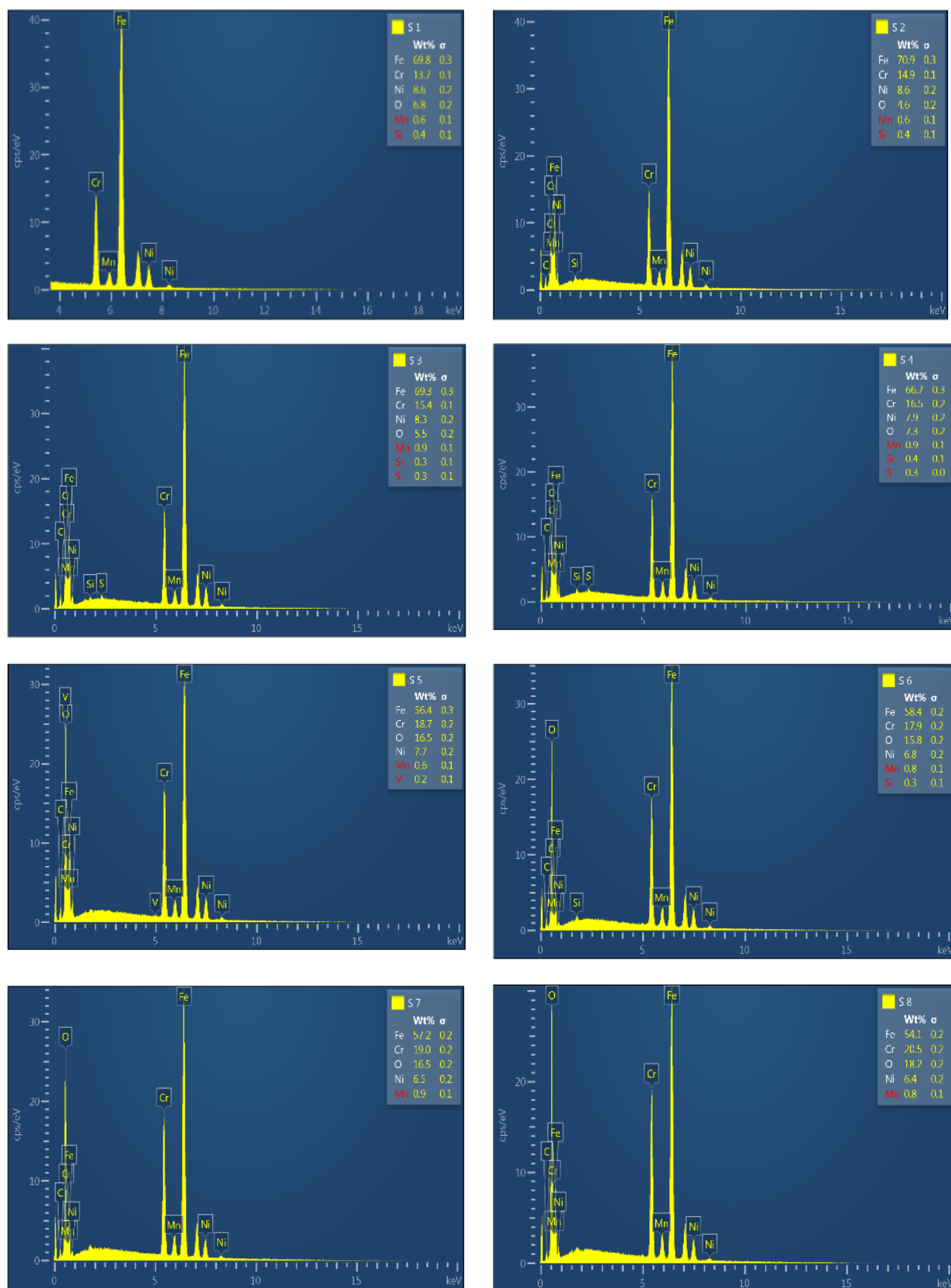


Рисунок 3.12. – Спектрограмма химического состава точек №S1-S8 при изучении поверхности образца Красно-оранжевый (группа RAL 2001)

На рисунке 3.13 показана микроструктура образца цвета Черно-зеленый (группа RAL 6012) и расположение точек исследования на поверхности стали. На рисунке 3.14 спектрограммы химического состава точек № S1- S7 образца Черно-зеленый (группа RAL 6012). Химический состав точек исследования представлен в таблице 3.12.

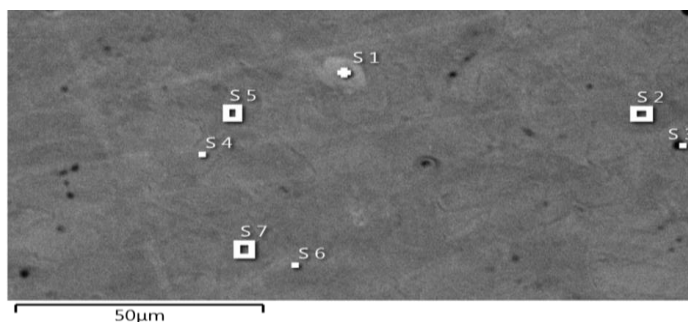


Рисунок 3.13. – Микроструктура образца цвета Черно-зеленый (группа RAL 6012) и расположение точек исследования на поверхности стали

Таблица 3.12. - Химический состав в % WT и в % AT точек исследования поверхности образца Черно-зеленый (группа RAL 6012)

Total table % WT												
Спектральная точка	O	F	Na	Al	Si	Cl	K	Cr	Mn	Total		
S 1	4.16				0.4			17.55	0.8	100		
S 2	4.92							18.16	1	100		
S 3	4.2	1.31	0.88		0.31	0.7	0.44	17.44	0.7	100		
S 4	4.18				0.36			17.65	1	100		
S 5	3.92				0.37			17.51	1	100		
S 6	3.95			0.23	0.3			17.22	0.9	100		
S 7	4.47				0.37			17.37	1	100		
Total table % AT												
Спектральная точка	O	F	Na	Al	Si	Cl	K	Cr	Mn	Fe	Ni	Total
S 1	13.01				0.71			16.88	0.7	61.9	6.76	100
S 2	15.16							17.23	0.9	60.6	6.15	100
S 3	12.64	3.31	1.85		0.53	0.94	0.54	16.13	0.6	57.6	5.89	100
S 4	13.06				0.64			16.97	0.9	61.9	6.61	100
S 5	12.33				0.67			16.93	0.9	62.4	6.72	100
S 6	12.4			0.42	0.53			16.62	0.8	62.3	6.96	100

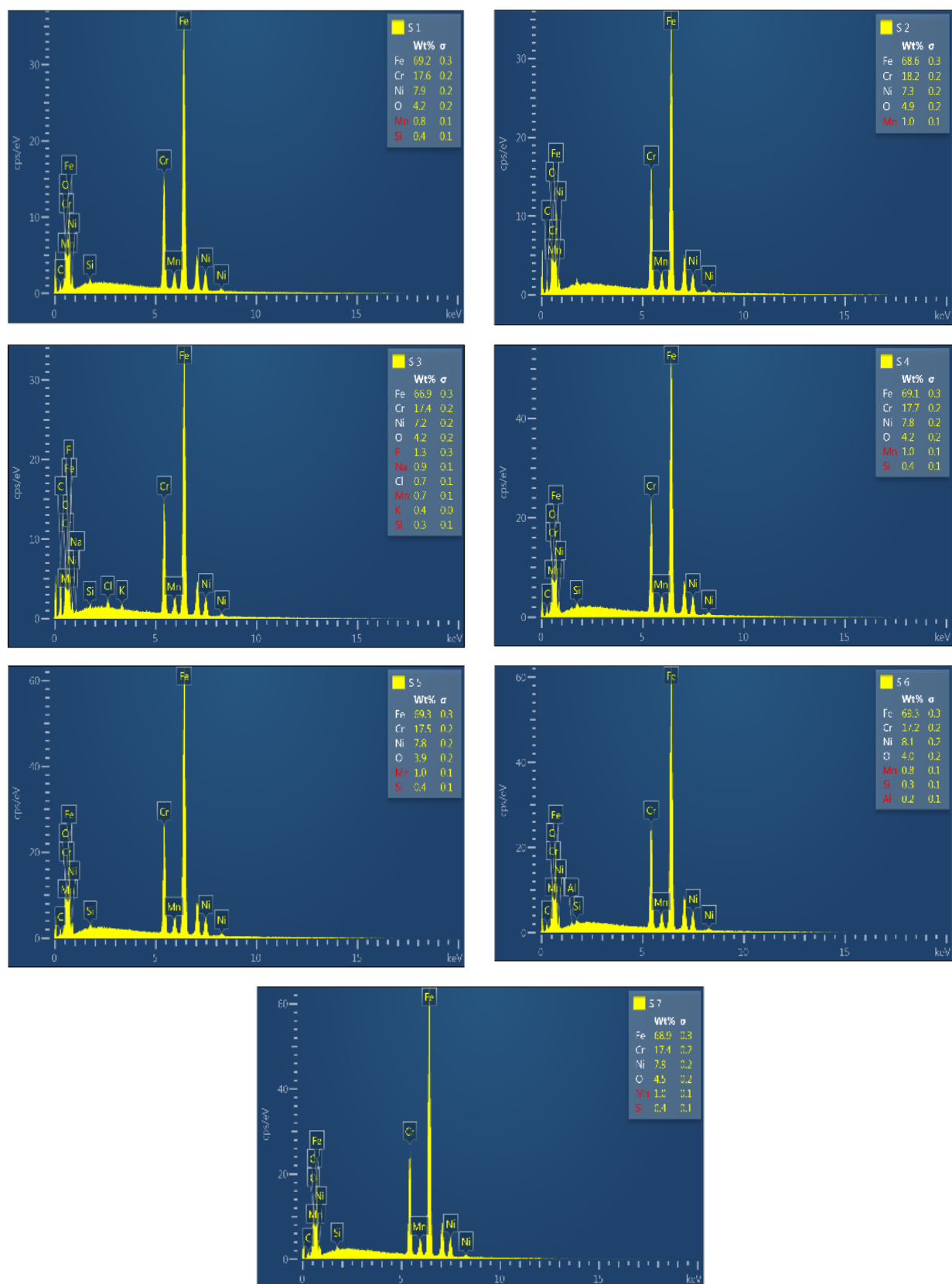


Рисунок 3.14 – Спектрограмма химического состава исследуемых точек № S1-S7 при изучении поверхности образца Черно-зеленый (группа RAL 6012)

На рисунке 3.15 показана микроструктура образца цвета Золотисто-желтый (группа RAL 1004) и расположение точек исследования на поверхности стали. На рисунке 3.16 представлены спектрограммы химического состава точек № S1- S8. Химический состав точек исследования поверхности образца цвета Золотисто-желтый (группа RAL 1004) представлен в таблице 3.13.

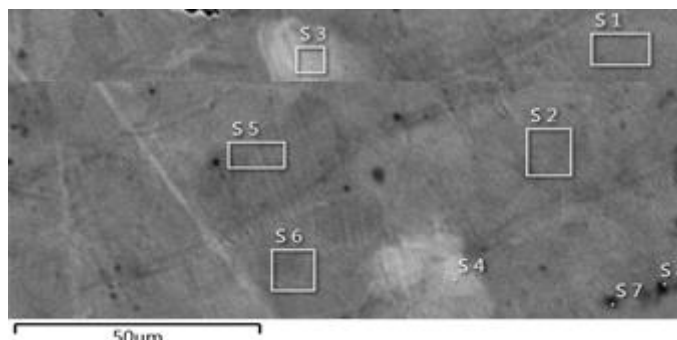


Рисунок 3.15 – Микроструктура образца цвета Золотисто-желтый (группа RAL 1004) и расположение точек исследования на поверхности стали

Таблица 3.13. - Химический состав в % WT и в % AT. точек исследования поверхности образца Золотисто-желтый (группа RAL 1004)

Total table %WT												
Spectrum Label	O	F	Na	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Total
S 1	2.39			0.21	0.44			18.08	1.1	69.5	8.27	100
S 2	3.29				0.52			18.21	1.1	69	7.84	100
S 3	2.54	1.6			0.44			17.55	0.9	69.2	7.78	100
S 4	2.14				0.39	0.17		18.07	1	70.4	7.82	100
S 5	2.48				0.56			18.04	1	69.7	8.17	100
S 6	2.28				0.45			18.28	1	70	8	100
S 7	3.52		0.58		0.47		0.15	17.89	0.9	68.6	7.86	100
S 8	2.95				0.5			17.99	0.9	69.8	7.89	100
Total table% AT												
Spectrum Label	O	F	Na	Al	Si	S	Ca	Cr	Mn	Fe	Ni	Total
S 1	7.76			0.41	0.81			18.05	1	64.7	7.32	100
S 2	10.46				0.94			17.83	1	62.9	6.8	100
S 3	8.01	4.24			0.78			17.01	0.9	62.4	6.68	100
S 4	6.99				0.72	0.28		18.17	1	65.9	6.97	100
S 5	8.03				1.03			17.99	1	64.8	7.22	100
S 6	7.45				0.83			18.33	1	65.3	7.11	100
S 7	11.06		1.26		0.84		0.19	17.3	0.9	61.7	6.74	100
S 8	9.47				0.92			17.76	0.8	64.1	6.9	100

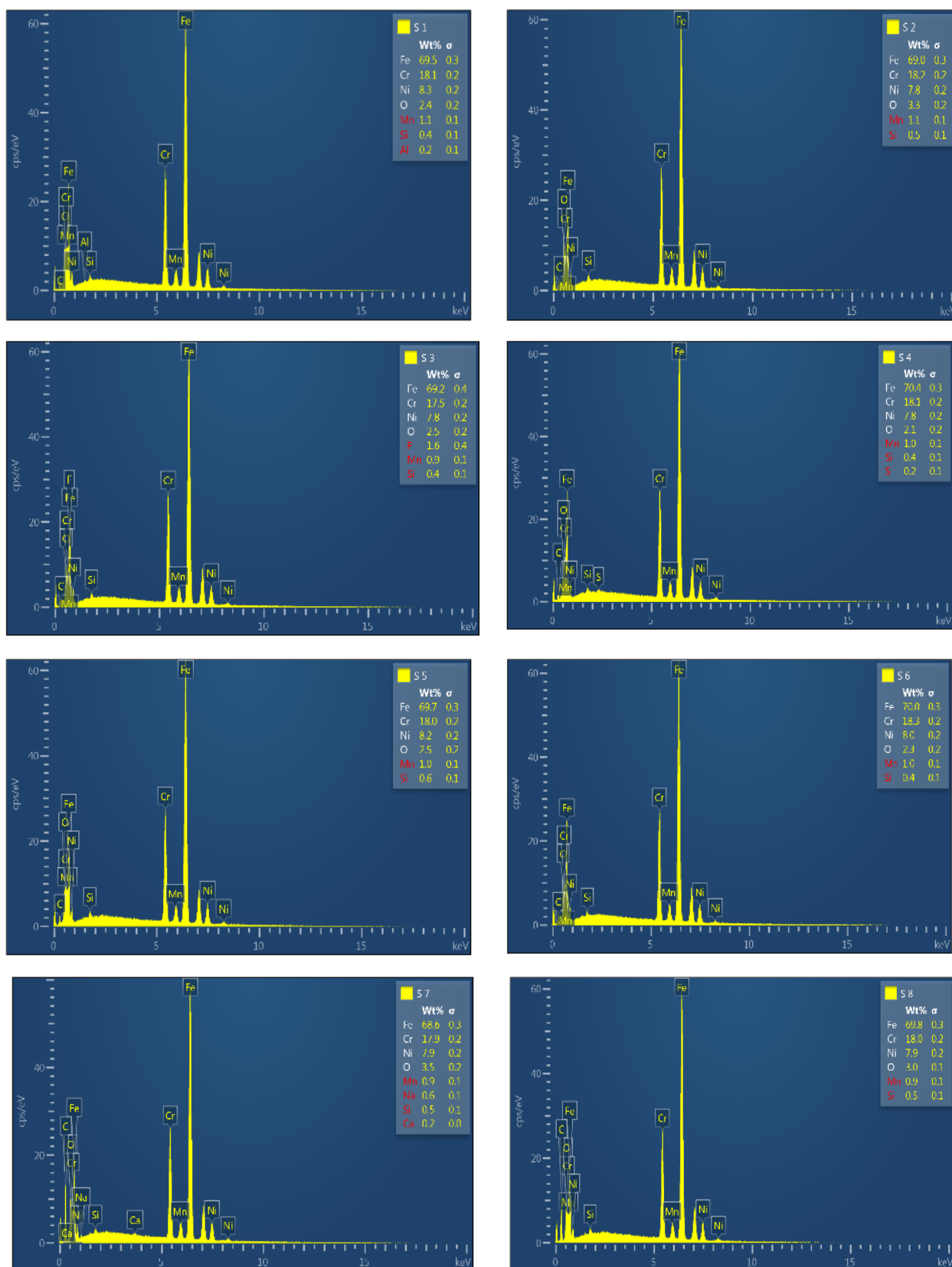


Рисунок 3.16 – Спектрограмма химического состава исследуемых точек № S1 – S8 при изучении поверхности образца цвета Золотисто-желтый (группа RAL 1004)

Итоговые результаты фазового анализа поверхностных пленок, полученный в результате проведения данного исследования, представлены в таблице 3.14.

Таблица 3.14. – Результаты фазового анализа поверхностных пленок разноокрашенных образцов из стали 12X18H10T

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
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

Качественный фазовый анализ оксидных пленок на поверхности стали 12X18H10T, показал наличие окислов железа (Fe₃O₄) и никеля (NiO₄). Кроме того, наблюдали твердый раствор хрома и никеля в железе. Эти элементы обладают близкими кристаллохимическими параметрами. Можно предположить также наличие на поверхности образцов защитной оксидной пленки хрома, которая не была зафиксирована из-за очень малой толщины, но в данном случае должна присутствовать, так как содержание хрома в исследуемой стали весьма велико (18 %). Режим лазерного излучения при котором в оранжево-красных оксидных пленках на поверхности стали 12X18H10T образуются защитные наночастицы состава NiO₄Fe_{2,6}·O₄:

f – частота следования импульсов - 100 кГц;
 P – мощность лазерного излучения средняя - 80 Вт;
 L – расстояние между проходами луча -- 0,005 мм;
 V – скорость продвижения луча – 400 мм/с;
 N – количество проходов – 1.

С изменением окрашивания пленок в значительной степени изменяется массовая доля фаз, например окислов железа: от 56 % в пленках образца «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025) до 13,1 % в пленках образца Золотисто-желтый (группа RAL 1004) [39].

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

При отличающихся параметрах лазерного излучения сформирована различная структура оксидных пленок на поверхности исследованных образцов из стали 12Х18Н10Т. Сканирующая электронная микроскопия при больших увеличениях показала, что при различных параметрах лазерного излучения качество оксидных пленок отличается с точки зрения трещинообразования. При ряде режимов лазерного излучения в оксидных пленках наблюдали образование трещин, наиболее очевидно зафиксированных лишь при увеличении $\times 7000$. Формирование сетки трещин в окисных пленках не может не снизить качество наносимой лазерной маркировки.

Микроструктура образца «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025) представлена на рисунке 3.17, а режим лазерной обработки приведен ниже:

- частота импульсов $F = 50 \text{ кГц}$;
- мощность излучения $P = 60 \text{ Вт}$;
- расстояние между растрами $L = 0,005 \text{ мм}$;
- скорость продвижения луча $V = 500 \text{ мм/сек}$;
- число проходов $N = 2$.

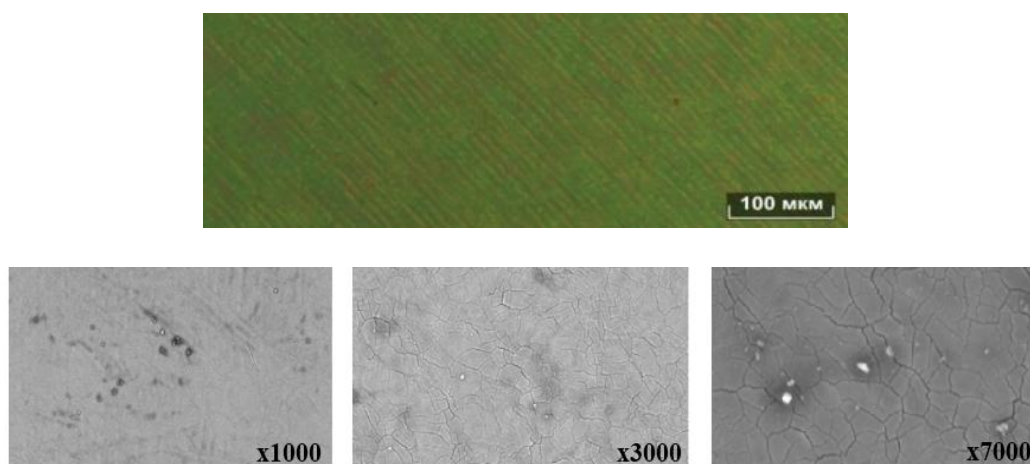


Рисунок 3.17 – Микроструктура поверхности образца «Зеленый папоротник» (группа RAL 6025) при увеличениях x1000, x3000 и x7000

Микроструктура образца «Красно-оранжевый» (группа RAL 2001) представлена на рисунке 3.18, а режим лазерной обработки приведен ниже:

- частота импульсов $F = 100 \text{ кГц}$;
- мощность излучения $P = 80 \text{ Вт}$;
- расстояние между растрами $L = 0,005 \text{ мм}$;
- скорость продвижения луча $V = 400 \text{ мм/сек}$;
- число проходов $N = 1$

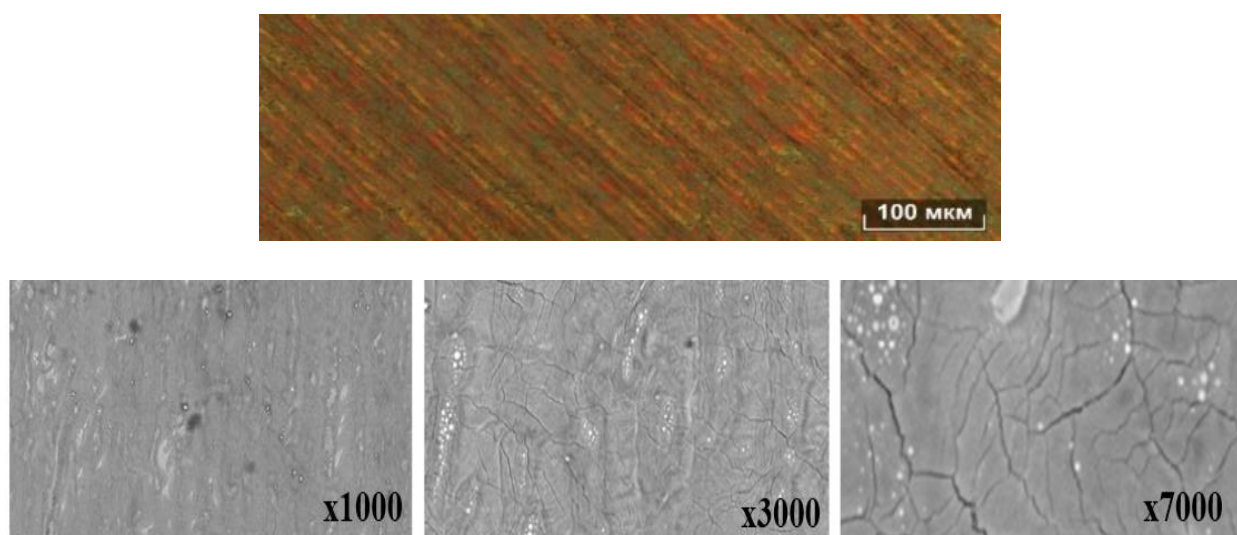


Рисунок 3.18 – Микроструктура поверхности образца «Красно-оранжевый» (группа RAL 2001) при увеличениях x1000, x3000 и x7000

Микроструктура поверхности образца «Черно-зеленый» (группа RAL 6012) при увеличениях $\times 1000$, $\times 3000$: и $\times 7000$ представлена на рисунке 3.19, а режим лазерной обработки прописан ниже:

- частота импульсов $F = 20 \text{ кГц}$;
- мощность излучения $P = 35 \text{ Вт}$;
- расстояние между растрами $L = 0,001 \text{ мм}$;
- скорость продвижения луча $V = 300 \text{ мм/сек}$;
- число проходов $N = 1$

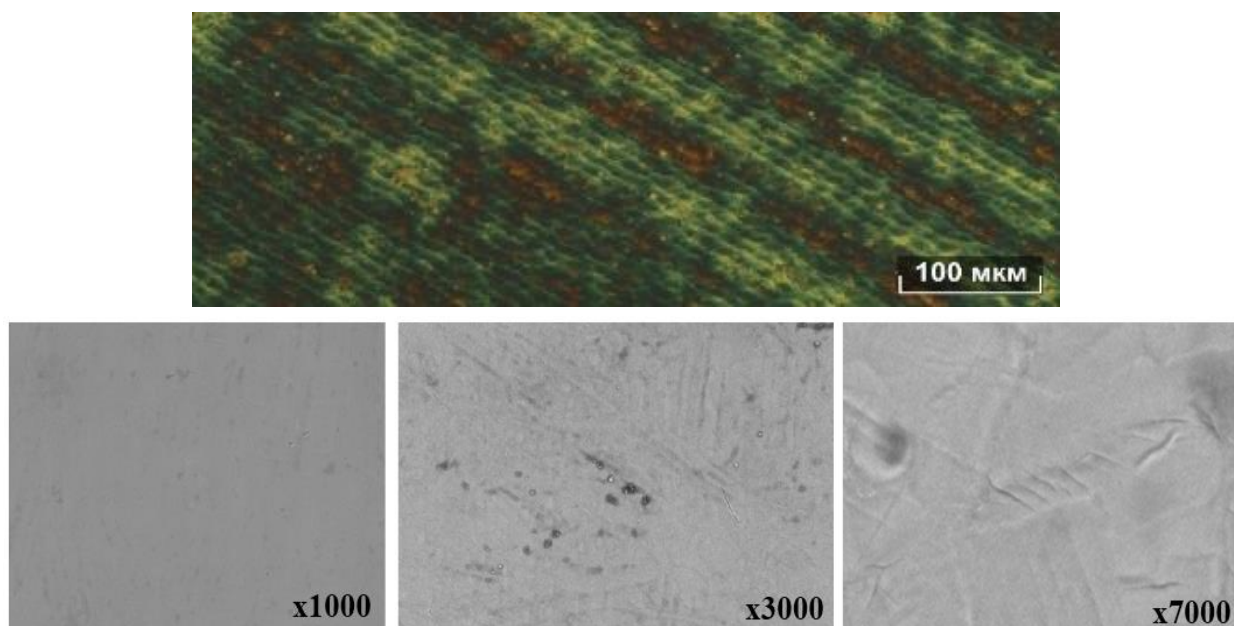


Рисунок 3.19 – Микроструктура поверхности образца «Черно-зеленый» (группа RAL 6012) при увеличениях $\times 1000$, $\times 3000$ и $\times 7000$

Микроструктура поверхности образца «Золотисто-желтый» (группа RAL 1004), а режим при увеличениях $\times 1000$, $\times 3000$ и $\times 7000$ представлена на рисунке 3.20, а режим лазерной обработки данного образца приведен ниже:

- частота импульсов $F = 100 \text{ кГц}$;
- мощность излучения $P = 80 \text{ Вт}$;
- расстояние между растрами $L = 0,003 \text{ мм}$;
- скорость продвижения луча $V = 300 \text{ мм/сек}$;
- число проходов $N = 1$

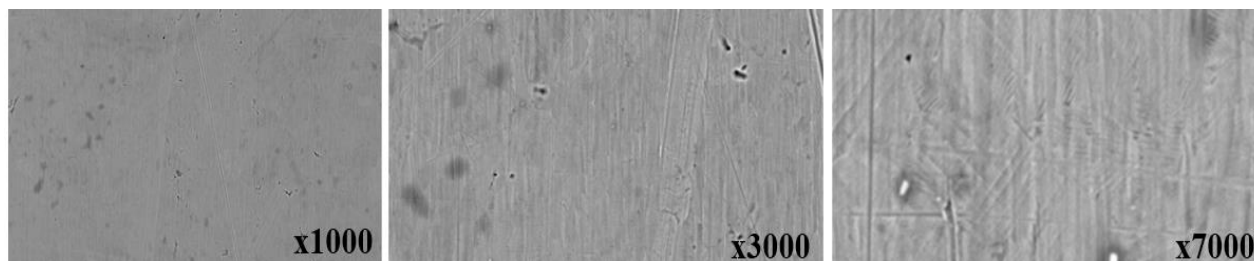
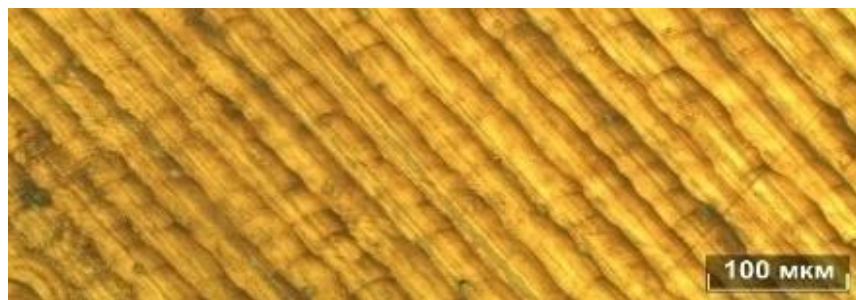


Рисунок 3.20 – Микроструктура поверхности образца «Золотисто-желтый» (группа RAL 1004) при увеличениях x1000, x3000 и x7000

Сетка трещин образовалась при:

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

Трещины на обработанной поверхности отсутствуют при следующих параметрах:

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

При отличающихся параметрах лазерного излучения сформирована различная структура оксидных пленок на поверхности исследованных образцов из стали 12Х18Н10Т. Сканирующая электронная микроскопия при больших увеличениях показала, что при различных параметрах лазерного излучения качество оксидных пленок отличается с точки зрения механических свойств. Ряд

режимов лазерного излучения спровоцировали в оксидных пленках трещинообразование, наиболее очевидно зафиксированное лишь при увеличении $\times 7000$. Сетка трещин образовалась при более высоких скоростях продвижения луча (400...500 мм/с), наименьшем расстоянии между проходами луча (0,005 мм). Увеличение мощности лазерного излучения до 80Вт, частоты импульсов до 100кГц и скорости продвижения луча до 400 мм/сек привело к образованию многочисленных трещин на поверхности металла. Повторное прохождение луча, по-видимому, также способствовало образованию трещин на поверхности образцов. Трещины на обработанной поверхности отсутствуют при мощности лазерного излучения 35 Вт, частоте импульсов 20 кГц и скорости прохождения луча 300мм/сек. Формирование сетки трещин в окисных пленках не может не снизить качество наносимой лазерной маркировки.

3.4. Выводы по третьей главе

1. Установлено влияния микрогеометрии сложного регулярного рельефа поверхности, сформированного при ЦЛМ, на цветообразование на поверхности нержавеющей стали. Определена корреляция между шириной неровностей рельефа и цветом окрашивания поверхности нержавеющей стали.

2. Определены режимы ЦЛМ для получения цветов на поверхности нержавеющей стали, соответствующих ряду контрастных групп по шкале RAL:Зеленый папоротник (группа RAL 6025); Красно-оранжевый (группа RAL 2001); Черно-зеленый (группа RAL 6012);Золотисто-желтый (группа RAL 1004).

3. Установлено, что изменение глубины неровностей регулярного рельефа на поверхности нержавеющей стали в 1,5 раза полностью изменяет цвет окрашивания поверхности;при этом параметры шероховатостиизменялись в диапазоне $R_a = 0,261 \dots 0,167$ мкм и $R_z = -3,063 \dots 1,870$ мкм.

4. Изучен фазовый состав пленок на поверхности металла при лазерной маркировке металлической поверхности Исследование показало, изменению окрашивания пленок в значительной степени соответствует изменение массовой доли оксидов.железа: от 56% в пленках образца «Зеленый папоротник» (группа

RAL 6025) до 13,1 % в пленках образца Золотисто-желтый (группа RAL 1004). Оксидные пленки на поверхности стали 12X18H10T, возникшие в результате лазерной обработки, содержат Fe_3O_4 и NiO_4 на основе растворов Cr и Ni.

5. Изучено механическое состояние оксидных пленок с помощью электронной микроскопии. Исследование показало, что ряд режимов лазерного излучения спровоцировали в оксидных пленках трещинообразование. Эти трещины можно отчетливо наблюдать лишь при увеличении $\times 7000$. 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. Формирование сетки трещин в окисных пленках не может не снизить качество наносимой лазерной маркировки.

ГЛАВА 4. ИЗУЧЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ И ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ ХРОМИСТЫХ ГАЛЬВАНИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ 08 И ЛАТУНИ Л63

4.1. Получение и исследование цветового изображения на стали 0,8 и латуни Л63

Рассмотрена зависимость получаемого цветового изображения при лазерной маркировке 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 [40].

Выбор для исследования образцов из стали и латуни обоснован помимо широкого распространения в промышленности, прежде всего их различными теплофизическими свойствами. Параметры теплопроводности, теплоемкости и температуропроводности, использованных в эксперименте материалов, представлены в таблице 4.1. [41].

Таблица 4.1. –Теплофизические характеристики металлов подложки [42]

Характеристика	Металл	
	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

Покрытие образцов гальваническим хромом позволило уровнять 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 необходимо нанести покрытие хрома толщиной 1 мкм. Расчет времени хромирования для получения толщины покрытия 1 мкм производился по формуле, предложенной Ямпольским А.М [43]:

$$t = 1000 \times \frac{h \times \gamma}{C \times D_k \times \alpha}, \quad (4)$$

где t – время хромирования, мин; h — толщина слоя хромового покрытия, мм; γ – удельный вес хрома, г/см³; C – электрохимический эквивалент, г/(А·час); α – выход хрома по току, %; D_k – плотность тока, А/дм².

Поверхность образца очищена от пыли и обезжирена. Для получения толщины покрытия хрома 1 мкм на стальной и латунной пластинах было затрачено 2 минуты.

В связи с тем, что о лазерной обработке хромированных покрытий с целью получения управляемого формирования цвета в научных первоисточниках сведений нет, первоначально была проведена тестовая обработка.

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. Проведенные исследования показали, что, применяя параметры лазерной маркировки, представленные в таблице, при условии использования образцов соответствующих исследуемым, гарантировано воспроизведение цветовых изображений, представленных на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1 – Воспроизведение цветовых изображений, полученных в соответствии с различными режимами лазерной маркировки на хромированных поверхностях стали 08 и латуни Л63, снятых под углом 90°

Цвета идентифицировали с помощью шкалы цветов NCS (англ. Natural Color System, естественная система цвета) Используя NCS идентифицированы некоторые полученные цвета. При этом производилось сравнение оригинального по NCS с цветом, зафиксированным фотокамерой. Результаты представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2. – Присвоение кода NCS цветовым сегментам

Код цвета NCS	Номера прямоугольных сегментов
Для образца из хромированной стали 08	
S 4050-GY	1
S 5540-G10Y	2
S 5030-Y40R	3
Для образца из хромированной латуни Л63	
S 7020-G90Y	1
S 5040-Y60R	2
S 2060-G70Y	3

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.

4.2 Математическая модель

На основании данного исследования была разработана математическая модель в виде совокупности количественных характеристик определенного

процесса и связей между ними [44]. Для получения математической модели нашего исследования были выбраны следующие параметры:

– коэффициент перекрытия пятен, получаемых с помощью лазерного луча:

$$K = \frac{D_n - \frac{V}{f}}{D_n}; \quad (4)$$

– тепловая энергия на поверхности исследуемого образца после лазерного излучения:

$$T = \frac{2(1-R) \cdot Q}{\lambda' \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}} \cdot \sqrt{\frac{\lambda' \cdot t}{\rho \cdot c \cdot \pi}}; \quad (5)$$

– мощность импульса лазерного излучения, которая требуется чтобы исследуемую поверхность разогреть:

$$Q = \frac{T \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}}{2(1-R)} \cdot \sqrt{\frac{\lambda' \cdot \rho \cdot c \cdot \pi}{t}}; \quad (6)$$

– скорость прохода получим из выражения коэффициента перекрытия, полученного в ходе исследования. И объединяя представленные выражения, выведем формулу математической модели

$$f = Q' \cdot \frac{2(1-R)}{T \cdot \pi \cdot \frac{D^2}{4}} \cdot \sqrt{\frac{1}{t \cdot \lambda' \cdot \rho \cdot c \cdot \pi}}; \quad (7)$$

где f – частота следования импульсов; Q' – усредненный параметр мощности; c – параметр характеризующий удельную теплоемкость материала; λ' – параметр характеризующий теплопроводность материала; D – размер лазерного пятна; Q – мощность импульса; t – время одного импульса; R – параметр характеризующий степень отражения световой энергии.

Указанные параметры необходимы для разработки программы для автоматизированного получения цветowych изображений. Расчеты были проведены в математической программе *Fast Formula Painter*. Результаты расчета обработаны, систематизированы и представлены в виде таблицы 4.3.

Таблица 4.3. – Результаты расчета параметров лазерной обработки

№	Расстояние между растрами, мм	Скорость прохода, мм/с	Число проходов	Мощность импульса 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

4.3 Разработка автоматизированного нанесения цветового изображения на хромированные поверхности

Полученные в ходе работы данные зафиксированы и использованы для написания программного обеспечения для лазерной установки на языке программирования JavaScript [46]. 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.

Программа для подбора параметров лазерной маркировки «Лазкон», была зарегистрирована 06 марта 2024 года, о чем говорит «Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024615431 (рисунок 4.4) [48].

Данная программа предназначена для взаимодействия с базой данных параметров лазерного излучения для получения определенного цветового изображения на материалах, внесенных в программу. Программа обеспечивает выполнение следующих функций:

- выбор материала изделия, выбор желаемого цвета;
- вывод на экран доступной палитры цветов в зависимости от выбранного материала изделия;
- выбор цвета, желаемого к получению на изделии;
- вывод на экран параметров лазерного излучения в зависимости от выбранного цвета;
- добавление новых записей в базу данных.
- представление данных в виде таблицы.

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



СВИДЕТЕЛЬСТВО

о государственной регистрации программы для ЭВМ

№ 2024615431

**Программа для подбора параметров лазерной
маркировки «Лазкон»**

Правообладатель: *Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический
университет «МИСИС» (НИТУ МИСИС) (RU)*

Авторы: *Городник Никита Вячеславович (RU), Наумова
Маргарита Геннадьевна (RU), Морозова Ирина
Георгиевна (RU), Петросян Дмитрий Камоевич (RU)*



Заявка № 2024614096

Дата поступления 29 февраля 2024 г.

Дата государственной регистрации

в Реестре программ для ЭВМ 06 марта 2024 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Ю.С. Зубов

Рисунок 4.4. – Свидетельство о регистрации программы

4.4 Выводы по главе четыре

1. Определено влияние различия теплофизических характеристик материалов-подложек (стали 08 и латуни Л63) на формирование цветового изображения на материале-покрытии – хrome при лазерной маркировке.
2. Получены воспроизводимые цветовые изображения на хромированной стали 08 и латуни Л63. Наиболее характерные цветовые изображения оценены по шкале NCS: S 4050-GY, S 5540-G10Y, S 5030-Y40R, S 7020-G90Y, S5040-Y60R, S 2060-G70Y.
3. Разработаны режимы ЦЛМ воспроизводимых цветовых изображений на хромированной стали 08 и латуни Л63.
4. Разработана математическая модель в виде совокупности количественных характеристик определенного процесса лазерной маркировки и связей между ними
5. Разработана программа для подбора параметров лазерной маркировки «Лазкон» зарегистрированная 06 марта 2024 года, «Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2024615431

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 $Ra = 0,261 \dots 0,167$ мкм и $Rz = 3,063 \dots 1,870$ 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 ПУБЛИКАЦИЙ

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 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 топологию 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 Металлург. – 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 // Metallurg. – 2023. – № 2. – С. 63-69. – DOI 10.52351/00260827_2023_02_63.

Режим доступа: <https://elibrary.ru/item.asp?id=50285189>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 ГОСТ Р 59736-2021 Лазерная маркировка металлических изделий. Технологический процесс [Текст]. Введ. 2021-10-12. – М.: Изд-во стандартов, 2021 – 12 с.
- 2 Упаковка и маркировка товаров [Текст]: учеб. для вузов / [В.И. Криштафович, Д.В. Криштафович, Б.У. Байхожаева и др.]; М.: КноРус 2021 – 261 с.
- 3 Гогорьянц А.Г. Основы лазерной обработки материалов [Текст] / А.Г. Гогорьянц. – М.: Машиностроение, 1989 – 384 с.
- 4 Ганзуленко О.Ю. Технология лазерной маркировки серийных изделий из металлических и полимерных материалов с целью защиты их от подделок и идентификации [Текст] / О.Ю. Ганзуленко, Е.В. Ларионова, А.П. Петкова // Наукоеведение, 2013. – №4 – с. 12.
- 5 Борейшо А.С. Лазеры: устройство и действие [Текст]: учеб. для вузов / А.С. Борейшо, С.В. Иванкин. – СПб.: ИКЦ «Лань», 2016. – 304 с.
- 6 Харанжевский Е.В. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество. Учебное пособие [Текст] / Е.В. Харанжевский, М.Д. Кривилёв – Иж.: Удмуртский университет, 2011 – 187 с.
- 7 Бенара Ж Окисление металлов [Текст] / Ж. Бенара. – М.: Металлургия 1969 – 444 с.
- 8 Кузнецов П.М. Особенности формирования рельефа на поверхности металлов в зоне воздействия лазерного излучения [Текст] / П.М. Кузнецов, В.А. Федоров – Вестник ТГУ, 2015. – №4 – 872-877 с.
- 9 Вейко В.П. Формирование многоцветного изображения на поверхности металлов при ее лазерном окислении [Текст] / Вейко В.П., Горный С.Г., Одинцова Г.В. – М.: Изв. Вузов. Приборостроение, 2011. – №2 т. 54.

10 Chichenev N.A. Using the similarity theory for description of laser hardening processes [Text] / Chichenev N.A., Gorbatyuk S.M., Naumova M.G., Morozova I.G // CIS Iron and Steel Review, 2020. №20, P. 44 – 47.

11 Абиьсиитов Г.А. Технологические лазеры: Справочник [Текст] / М.: Металлургия 1990 – 256 с.

12 Gorbatyuk S.M. Color Mark Formation on a Metal Surface by a Highly Concentrated Energy Source [Text] / S.M. Gorbatyuk, I.G. Morozova, M.G. Naumova // Metallurgist, 2016. Vol. 60, No 5-6. P.646-650.

13 Лившиц Б.Г. Металлография [Текст] / учеб. для вузов – М.: 1990 – 342 с.

14 Радаев В.В. Рынки контрафактной продукции в России [Текст] сб. науч. ст. / В.В. Радаев – М.: Изд. Дом ГУ ВШЭ, 2008 – 113 с.

15 Glukhov, L.M. Effective Laser Technology for Making Metal Products and Tools [Text] / L.M. Glukhov, S.M. Gorbatyuk, I.G. Morozova, M.G. Naumova // Metallurgist. 2016. Vol. 60, No. 3. P. 306–312.

16 Ганзуленко О.Ю. Исследование методом рентгеноструктурного анализа фазового состава поверхности металлических сплавов после импульсного лазерного излучения [Текст] / О.Ю. Ганзуленко // Интернет-журнал «Науковедение», 2013. №5, 14 – 17 с.

17 Химушин Ф.Ф. Нержавеющие стали уч. для вузов [Текст] / Ф.Ф. Химушин. – М.: Изд. «Металлургия», 1967 – 412 с.

18 Раузин Я.Р. Термическая обработка хромистой стали (для подшипников и инструментов) [Текст] / Я.Р. Раузин. – М.: изд. 3-е «МАШГИЗ», 1963 – 368 с.

19 Богданов А.В. Волоконные технологические лазеры и их применение [Текст]: уч. для вузов / А.В. Богданов, Ю.В. Голубенко. 2023. – 236 с.

20 Принцип работы оптоволоконного лазера [Электронный ресурс].-М.: Сайт компании DPM SYSTEM, 2022. – Режим доступа: <https://dpm-system.ru/informaciya/princip-raboty-optovolonno-go-lazera> - Загл. с экрана.

21 Ямпольский А.М. Краткий справочник гальванотехника [Текст] / А.М. Ямпольский, В.А. Ильин. // - Л.: «Машиностроение», 1981 – 158 с.

22 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. [Text] / M.G. Naumova, I.G. Morozova, Borisov P.V // Materials Today: Proceedings : International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, Vol. 19, P. 2405-2408.

23 Ландгребе Л. Феноменология Эдмунда Гуссерля [Текст] / Перевод: И.И. Докучаев, З.В. Фиалковский. Изд. «Русский Миръ», 2018 - 403 с.

24 Феноменологический метод исследования [Электронный ресурс]. – М.: Презентация Атаманчукова А.В., Жаргалон Л.О., 2022. – Режим доступа: <https://www.hse.ru/data/2013/11/28/1337607510/Феноменологический%20метод%20исследования.pdf?ysclid=luohrq0pk2611527573> – Загл. с экрана.

25 Гуревич М.М. Цвет и его измерение [Текст] / М.М. Гуревич. - М.; -Л.: Изд. «АН СССР» - 1950 – 432 с.

26 Дисперсия света. Цветовой диск Ньютона [Электронный ресурс].-М.: Российский учебник, 2022. – Режим доступа: https://rosuchebnik.ru/material/dispersiya-sveta-tsvetovoy-disk-nyutona-7587/?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru - Загл. с экрана.

27 Атлас цветов Ньютона [Электронный ресурс].-М.: Большая российская энциклопедия, 2004-2017. – Режим доступа: https://old.bigenc.ru/technology_and_technique/text/1837610?ysclid=luoi3hdsrj596029351 – Загл. с экрана.

28 Wikipedia [Электронный ресурс].-М.: Свободная энциклопедия, 2022 – Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/RAL_colour_standard – Загл. с экрана.

29 Цвета NSC [Электронный ресурс].-М.: Инструмент для подбора цветов и генерации цветовых схем, 2009-2024 – Режим доступа:

<https://colorscheme.ru/ncs-colors.html?ysclid=luoiccw8cx640597630> – Загл. с экрана.

30 Learn the NCS System [Электронный ресурс].-М.: Сайт компании NCS, 2023 – Режим доступа: <https://ncscolour.com/en-int/pages/the-system> - Загл. с экрана.

31 Зенков А.В. Численные методы [Текст] уч. для вузов / А.В. Зенков. – Екб.: Изд. Уральского университета, 2016 – 128 с.

32 Детали машин и основы конструирования [Текст] / [С.М. Горбатюк, М.Г. Наумова, И.Г. Морозова и др.]. – М : Изд. Дом МИСиС, 2014 – 377 с.

33 Kubelka, P.: New contributions to the optics of intensely light-scattering materials. / P. Kubelka. Part I. J. Opt. Soc. Am. 38, 448–457 (1991)

34 Duntley S. Surface roughness / S. Duntley // IosA. - 1942. - Vol. 32. - № 2. -Р. 61-70.

35 Энциклопедия техники [Электронный ресурс].-М.: Рентгеновский дифрактометр, 2023 – Режим доступа: <https://enciklopediya-tehniki.ru/rentgenovskiy-difraktometr.html> - Загл с экрана.

36 Сайт компании Canon [Электронный ресурс].-М.: EOS 5D Mark III, 2023 – Режим доступа: https://www.canon.ru/for_home/product_finder/cameras/digital_slr/eos_5d_mark_iii/ - Загл с экрана.

37 Антонов Д.Н. Окрашивание поверхности металлов под действием импульсного лазерного излучения [Текст] / Д.Н. Антонов, А.А. Бурцев, О.Я. Бутковский // Журнал технической физики 2014. – №10 – 16 с.

38 Gorbakyuk S.M. Effect of laser treatment modes on metal surface marking color. / S.M. Gorbakyuk, I.G. Morozova, M.G. Naumova, N.A. Chichenev // CIS Iron and Steel Review. 2020 - Vol. 20, P. 37-40.

39 Morozova I.G. Qualitative Phase Analysis of Oxide Films on a Steel 12KH18N10T Surface Formed as a Result of Applied Laser Marking / I.G. Morozova, M.G. Naumova, V.A. Nagovitsyn, R.Y. Kazbekov // Metallurgist. 2023, 67(1-2), P. 191–200.

40 Лобанов М.Л. Защитный покрытия [Текст] / М.Л. Лобанов, Н.И. Кардолина, Н.Г. Россина, А.С. Юровских // - Екб.: Изд. Уральского университета, 2014 – 212 с.

41 Морозова И.Г. Качественный фазовый анализ оксидных пленок на поверхности стали 12Х18Н10Т, образованных в результате заданной лазерной маркировки / И.Г. Морозова, М.Г. Наумова, В.А. Наговицин, Р.Ю. Казбеков // Металлург - №2, 2023 – 63-69.

42 Терехов С.В. Тепловые свойства металлов [Текст] уч для вузов / С.В. Терехов. – Дон.: Изд.: Донецкий физико-технический институт им. А.А. Галкина, 2023 – 186 с.

43 Михнюк С.И. Единые нормативы времени и нормы обслуживания на гальванические покрытия и механическую подготовку поверхностей [Текст] / С.И. Михнюк, В.К. Хайновский // - М.: Изд. «Ворошиловградская правда, 1976 – 289 с.

44 Сабуров П.С. Математическое моделирование [Текст] / П.С. Сабуров // -Вл.: 2016 – 131 с.

45 Кодинко Н. Технология лазерной маркировки материалов [Текст] / Н. Кодинко, А. Иванов // Электроника, №3, 2010 – 31 – 36 с.

46 Крокфорд Д. Как устроен JavaScript [Текст] / Перевод: Н. Вильчинский // Спб.: 2019 – 304 с.

47 Рожкова М.А. Интеллектуальная собственность: основные аспекты охраны и защиты: учебное пособие [Текст] / М.А. Рожкова // -М.: Изд. «Проспект» 2014 – 243 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Заданные параметры лазерного излучения для получения ЦЛМ на опытной пластине из нержавеющей стали 12ХН10Т

Таблица П 1.1 – Параметры излучения для пластины 12ХН10Т

№ ряда	№ слева в ряду	Энергия импульса, мДж	Скорость перемещения луча, мм/с	Расфокусировка, ΔF , мм
1	2	3	4	5
1.	1.	0,5	2,0	0,6
1.	2.	0,5	2,0	0,4
1.	3.	0,5	2,0	0,2
1.	4.	0,5	2,2	0,2
1.	5.	0,5	2,4	0,2
1.	6.	0,5	2,6	0,2
1.	7.	0,5	2,8	0,2
1.	8.	0,5	3,0	0,4
1.	9.	0,5	3,0	0,2
2.	1.	0,5	2,4	0,2
2.	2.	0,5	2,2	0,2
2.	3.	0,5	2,0	0,2
2.	4.	0,5	2,2	0,2
2.	5.	0,5	2,4	0,2
2.	6.	0,5	2,6	0,2
2.	7.	0,5	2,8	0,2
2.	8.	0,5	3,0	0,2
2.	9.	0,5	3,0	0,6
3.	1.	0,5	3,0	0,4
3.	2.	0,5	2,8	0,4
3.	3.	0,5	2,6	0,4
3.	4.	0,5	2,4	0,4
3.	5.	0,5	2,2	0,4
3.	6.	0,5	2,0	0,4
3.	7.	0,5	3,0	0,4
3.	8.	0,5	2,8	0,4
3.	9.	0,5	3,0	0,6
4.	1.	0,5	3,0	0,2
4.	2.	0,5	2,8	0,2
4.	3.	0,5	2,6	0,2
4.	4.	0,5	2,4	0,2

Продолжение таблицы П1.1.

1	2	3	4	5
4.	5.	0,5	2,2	0,2
4.	6.	0,5	3,0	0,4
4.	7.	0,5	2,4	0,4
4.	8.	0,5	2,2	0,4
4.	9.	0,5	2,0	0,4
5.	1.	0,5	2,6	0,3
5.	2.	0,5	2,4	0,3
5.	3.	0,5	2,6	0,3
5.	4.	0,5	2,4	0,3
5.	5.	0,5	2,6	0,2
5.	6.	0,5	2,4	0,2
5.	7.	0,5	2,2	0,2
5.	8.	0,5	2,0	0,2
5.	9.	0,5	2,6	0,6
5.	10.	0,5	2,8	0,6
5.	11.	0,5	3,0	0,6
6.	1.	0,5	3,0	0,2
6.	2.	0,5	3,0	0,4
6.	3.	0,5	2,8	0,4
6.	4.	0,5	2,8	0,2
6.	5.	0,5	2,6	0,2
6.	6.	0,5	2,4	0,2
6.	7.	0,5	2,2	0,2
6.	8.	0,5	2,0	0,4
6.	9.	0,5	2,0	0,2

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Параметры лазерного излучения получения ЦЛМ

Таблица П 2.1. – Параметры лазерного излучения для получения цветового изображения на исследуемых пластинах

Строка	№	F	P	L	V	n	Строка	№	F	P	L	V	n
1	1	200	100	0,005	200	1	5	10	150	100	0,03	600	2
	2	200	100	0,005	300	1		11	150	100	0,03	600	3
	3	200	100	0,005	400	1	6	№	F	P	L	V	n
	4	200	100	0,005	500	1		1	150	100	0,02	200	1
	5	200	100	0,005	500	1		2	150	100	0,02	200	1
	6	200	100	0,005	600	1		3	150	100	0,02	300	2
	7	200	100	0,005	600	1		4	150	100	0,02	300	2
№	F	P	L	V	n	5		150	100	0,02	400	2	
2	1	200	100	0,03	200	1		6	150	100	0,02	400	1
	2	200	100	0,03	200	2		7	150	100	0,02	500	1
	3	200	100	0,03	300	1		8	150	100	0,02	500	2
	4	200	100	0,03	300	2		9	150	100	0,02	600	3
	5	200	100	0,03	400	1		10	150	100	0,02	600	3
	6	200	100	0,03	400	2		№	F	P	L	V	n
	7	200	100	0,03	500	1	7	1	150	100	0,01	200	1
	8	200	100	0,03	500	2		2	150	100	0,01	300	1
№	F	P	L	V	n	3		150	100	0,01	300	2	
3	1	200	100	0,03	200	1		4	150	100	0,01	400	1
	2	200	100	0,03	200	2		5	150	100	0,01	400	2
	3	200	100	0,03	300	1		6	150	100	0,01	500	1
	4	200	100	0,03	300	2		7	150	100	0,01	500	2
	5	200	100	0,03	400	1		8	150	100	0,01	600	1
	6	200	100	0,03	400	2		9	150	100	0,01	600	2
	7	200	100	0,03	500	1		10	150	100	0,01	700	1
	8	200	100	0,03	500	2		11	150	100	0,01	700	2
№	F	P	L	V	n	12		150	100	0,01	800	1	
5	1	150	100	0,03	200	1		13	150	100	0,01	800	2
	2	150	100	0,03	300	1	8	№	F	P	L	V	n
	3	150	100	0,03	400	1		1	150	100	0,005	200	1
	4	150	100	0,03	400	2		2	150	100	0,005	400	1
	5	150	100	0,03	400	3		3	150	100	0,005	600	1
	6	150	100	0,03	500	1		4	150	100	0,005	700	1
	7	150	100	0,03	500	2		5	150	100	0,005	700	2
	8	150	100	0,03	500	3		6	150	100	0,005	800	1
	9	150	100	0,03	600	1		7	150	100	0,005	800	2

Продолжение таблицы П 2.1.

Строка	№	F	P	L	V	n	Строка	№	F	P	L	V	n
9	1	150	80	0,03	200	1	11	8	100	100	0,01	600	2
	2	150	80	0,03	300	1		9	100	100	0,01	700	1
	3	150	80	0,03	400	1		10	100	100	0,01	700	2
	4	150	80	0,02	400	1	12	№	F	P	L	V	n
	5	150	80	0,02	300	1		1	100	100	0,02	200	1
	6	150	80	0,02	200	2		2	100	100	0,02	300	1
	7	150	80	0,01	200	2		3	100	100	0,02	300	2
	8	150	80	0,01	300	2		4	100	100	0,02	400	1
	9	150	80	0,01	400	2		5	100	100	0,02	400	2
	10	150	80	0,005	400	3		6	100	100	0,02	500	1
	11	150	80	0,005	200	2		7	100	100	0,02	500	2
	12	150	80	0,005	300	2		8	100	100	0,02	600	1
	13	100	80	0,03	200	1		9	100	100	0,02	600	2
	14	100	80	0,03	300	1		10	100	100	0,02	700	1
	15	100	80	0,03	400	1		11	100	100	0,02	700	2
	16	100	80	0,02	400	2	13	№	F	P	L	V	n
	17	100	80	0,02	300	3		1	100	100	0,03	200	1
	18	100	80	0,02	200	3		2	100	100	0,03	300	1
	19	100	80	0,01	200	2		3	100	100	0,03	300	2
	20	100	80	0,01	300	2		4	100	100	0,03	400	1
	21	100	80	0,01	400	1		5	100	100	0,03	400	2
	22	100	80	0,005	400	1		6	100	100	0,03	500	1
	23	100	80	0,005	300	1		7	100	100	0,03	500	2
	24	100	80	0,005	200	1		8	100	100	0,03	600	1
	№	F	P	L	V	n		9	100	100	0,03	600	2
10	1	100	100	0,005	200	1	14	№	F	P	L	V	n
	2	100	100	0,005	400	1		1	50	100	0,005	200	1
	3	100	100	0,005	600	1		2	50	100	0,005	300	1
	4	100	100	0,005	600	2		3	50	100	0,005	400	1
	5	100	100	0,005	700	1		4	50	100	0,005	500	1
	6	100	100	0,005	700	2		5	50	100	0,005	600	1
	7	100	100	0,005	700	3		6	50	100	0,005	600	2
	8	100	100	0,005	800	1		7	50	100	0,005	700	1
	9	100	100	0,005	800	2		8	50	100	0,005	700	2
	10	100	100	0,005	800	3		9	50	100	0,005	800	1
11	№	F	P	L	V	n		10	50	100	0,005	800	2
	1	100	100	0,01	200	1		11	50	100	0,005	800	3
	2	100	100	0,01	300	1		12	50	100	0,005	900	1
	3	100	100	0,01	400	1		13	50	100	0,005	900	2
	4	100	100	0,01	400	2		14	50	100	0,005	900	3
	5	100	100	0,01	500	1		15	50	100	0,005	1000	1
	6	100	100	0,01	500	2		16	50	80	0,005	1000	1
	7	100	100	0,01	600	1		17	50	80	0,005	1000	2

Продолжение таблицы П 2.1.

Строка	№	F	P	L	V	n	Строка	№	F	P	L	V	n
14	18	50	80	0,005	1000	3	16	7	50	100	0,01	700	1
	19	50	80	0,005	900	1		8	50	100	0,01	700	2
	20	50	80	0,005	900	2		9	50	100	0,01	800	1
	21	50	80	0,005	900	3		10	50	100	0,01	800	2
	22	50	80	0,005	800	1		11	50	100	0,01	900	1
	23	50	80	0,005	800	2		12	50	100	0,01	900	2
	24	50	80	0,005	800	3		13	50	80	0,01	900	1
	25	50	80	0,005	700	1		14	50	80	0,01	900	2
	26	50	80	0,005	700	2		15	50	80	0,01	900	3
	27	50	80	0,005	700	3		16	50	80	0,01	800	1
	28	50	80	0,005	600	1		17	50	80	0,01	800	2
	29	50	80	0,005	600	2		18	50	80	0,01	800	3
	30	50	80	0,005	600	3		19	50	80	0,01	700	1
	31	50	80	0,005	500	1		20	50	80	0,01	700	2
	32	50	80	0,005	500	2		21	50	80	0,01	700	3
	33	50	80	0,005	500	3		22	50	80	0,01	600	1
	34	50	80	0,005	400	1		23	50	80	0,01	600	2
	35	50	80	0,005	400	2		Строка					
	36	50	80	0,005	400	3		1	50	60	0,01	200	1
	37	50	80	0,005	300	1		2	50	60	0,01	300	1
	38	50	80	0,005	300	2	17	3	50	60	0,01	300	2
	39	50	80	0,005	300	3		4	50	60	0,01	400	1
	40	50	80	0,005	200	1		5	50	60	0,01	400	2
	№	F	P	L	V	n		6	50	60	0,01	400	3
15	1	50	60	0,005	200	1		7	50	60	0,01	200	1
	2	50	60	0,005	300	1	18	Строка					
	3	50	60	0,005	300	2		1	50	100	0,02	200	1
	4	50	60	0,005	400	1		2	50	100	0,02	300	1
	5	50	60	0,005	400	2		3	50	100	0,02	400	1
	6	50	60	0,005	500	1		4	50	100	0,02	500	1
	7	50	60	0,005	500	2		5	50	100	0,02	500	2
	8	50	60	0,005	600	1		6	50	100	0,02	500	3
	9	50	60	0,005	600	2		7	50	100	0,02	600	1
	10	50	60	0,005	700	1		8	50	100	0,02	600	2
	11	50	60	0,005	700	2		9	50	100	0,02	600	3
	12	50	40	0,005	200	1		10	50	100	0,02	700	1
	№	F	P	L	V	n		11	50	100	0,02	700	2
16	1	50	100	0,01	200	1		12	50	100	0,02	700	3
	2	50	100	0,01	300	1		13	50	80	0,02	700	1
	3	50	100	0,01	400	1		14	50	80	0,02	700	2
	4	50	100	0,01	500	1		15	50	80	0,02	700	3
	5	50	100	0,01	600	1		16	50	80	0,02	600	1
	6	50	100	0,01	600	2		17	50	80	0,02	600	2

Продолжение таблицы П 2.1.

Строка	№	F	P	L	V	n	Строка	№	F	P	L	V	n
18	18	50	80	0,02	600	3	19	26	50	80	0,03	300	3
	19	50	80	0,02	500	1		27	50	80	0,03	200	1
	20	50	80	0,02	500	2		28	50	80	0,03	200	2
	21	50	80	0,02	500	3		29	50	60	0,03	200	1
	22	50	80	0,02	400	1		30	50	60	0,03	200	2
	23	50	80	0,02	400	2		31	50	60	0,03	200	3
	24	50	80	0,02	400	3		32	50	60	0,03	300	1
	25	50	80	0,02	300	1		33	50	60	0,03	300	2
	26	50	80	0,02	300	2		34	50	60	0,03	300	3
	27	50	80	0,02	200	1		35	50	60	0,03	400	1
	28	50	60	0,02	200	1		36	50	60	0,03	400	2
	29	50	60	0,02	200	2		37	50	60	0,03	400	3
	30	50	60	0,02	300	1		38	50	40	0,03	100	1
	31	50	60	0,02	300	2		№	F	P	L	V	n
	32	50	60	0,02	400	1		1	20	100	0,03	1000	1
	33	50	60	0,02	400	2		2	20	100	0,03	1500	1
	34	50	60	0,02	400	3		3	20	100	0,03	2000	1
Строка	№	F	P	L	V	n	20	4	20	100	0,03	2500	1
19	1	50	100	0,03	200	1		5	20	100	0,03	3000	1
	2	50	100	0,03	200	2		6	20	80	0,03	3000	1
	3	50	100	0,03	300	1		7	20	60	0,03	3000	1
	4	50	100	0,03	300	2		8	20	60	0,03	2000	1
	5	50	100	0,03	300	3		9	20	60	0,03	1000	1
	6	50	100	0,03	400	1		10	20	60	0,03	500	1
	7	50	100	0,03	400	2		11	20	40	0,03	1000	1
	8	50	100	0,03	400	3		12	20	40	0,03	900	1
	9	50	100	0,03	500	1		13	20	40	0,03	800	1
	10	50	100	0,03	500	2		14	20	40	0,03	600	1
	11	50	100	0,03	500	3		15	20	40	0,03	400	1
	12	50	100	0,03	600	1		16	20	40	0,03	200	1
	13	50	100	0,03	600	2		17	20	40	0,03	100	1
	14	50	100	0,03	600	3		18	20	40	0,02	1000	1
	15	50	80	0,03	600	1		19	20	40	0,02	800	1
	16	50	80	0,03	600	2		20	20	40	0,02	600	1
	17	50	80	0,03	600	3		21	20	40	0,02	400	1
	18	50	80	0,03	500	1		22	20	40	0,02	200	1
	19	50	80	0,03	500	2		23	20	40	0,02	100	1
	20	50	80	0,03	500	3		24	20	40	0,01	1000	1
	21	50	80	0,03	400	1		25	20	40	0,01	800	1
	22	50	80	0,03	400	2		26	20	40	0,01	600	1
	23	50	80	0,03	400	3		27	20	40	0,01	400	1
	24	50	80	0,03	300	1		28	20	40	0,01	200	1
	25	50	80	0,03	300	2		29	20	40	0,01	100	1

Продолжение таблицы П 2.1.

Строка	№	F	P	L	V	n	Строка	№	F	P	L	V	n
20	30	20	40	0,005	1000	1	21	37	20	35	0,02	300	4
	31	20	40	0,005	800	1		38	20	35	0,02	300	5
	32	20	40	0,005	600	1		39	20	35	0,03	50	1
	33	20	40	0,005	400	1		40	20	35	0,03	50	2
	34	20	40	0,005	200	1		41	20	35	0,03	100	1
	35	20	40	0,005	100	1		42	20	35	0,03	100	2
Строка	№	F	P	L	V	n		43	20	35	0,03	100	3
21	1	20	35	0,01	50	1		44	20	35	0,03	200	1
	2	20	35	0,01	50	2		45	20	35	0,03	200	2
	3	20	35	0,01	100	1		46	20	35	0,03	200	3
	4	20	35	0,01	100	2	Строка	№	F	P	L	V	n
	5	20	35	0,01	100	3	22	1	20	35	0,01	50	1
	6	20	35	0,01	200	1		2	20	35	0,01	50	2
	7	20	35	0,01	200	2		3	20	35	0,01	100	1
	8	20	35	0,01	200	3		4	20	35	0,01	100	2
	9	20	35	0,01	200	4		5	20	35	0,01	100	3
	10	20	35	0,01	300	1		6	20	35	0,01	200	1
	11	20	35	0,01	300	2		7	20	35	0,01	200	2
	12	20	35	0,01	300	3		8	20	35	0,01	200	3
	13	20	35	0,01	300	4		9	20	35	0,01	200	4
	14	20	35	0,01	300	5		10	20	35	0,01	300	1
	15	20	35	0,01	400	1		11	20	35	0,01	300	2
	16	20	35	0,01	400	2		12	20	35	0,01	300	3
	17	20	35	0,01	400	3		13	20	35	0,01	300	4
	18	20	35	0,01	400	4		14	20	35	0,01	300	5
	19	20	35	0,01	400	5		15	20	35	0,01	400	1
	20	20	35	0,01	500	1		16	20	35	0,01	400	2
	21	20	35	0,01	500	2		17	20	35	0,01	400	3
	22	20	35	0,01	500	3		18	20	35	0,01	400	4
	23	20	35	0,01	500	4		19	20	35	0,01	400	5
	24	20	35	0,01	500	5		20	20	35	0,01	500	1
	25	20	35	0,02	50	1		21	20	35	0,01	500	2
	26	20	35	0,02	50	2		22	20	35	0,01	500	3
	27	20	35	0,02	100	1		23	20	35	0,01	500	4
	28	20	35	0,02	100	2		24	20	35	0,01	500	5
	29	20	35	0,02	100	3		25	20	35	0,02	50	1
	30	20	35	0,02	200	1		26	20	35	0,02	50	2
	31	20	35	0,02	200	2		27	20	35	0,02	100	1
	32	20	35	0,02	200	3		28	20	35	0,02	100	2
	33	20	35	0,02	200	4		29	20	35	0,02	100	3
	34	20	35	0,02	300	1		30	20	35	0,02	200	1
	35	20	35	0,02	300	2		31	20	35	0,02	200	2
	36	20	35	0,02	300	3		32	20	35	0,02	200	3

Продолжение таблицы П 2.1.

Строка	№	F	P	L	V	n	Строка	№	F	P	L	V	n	
22	33	20	35	0,02	200	4	23	29	20	35	0,02	100	3	
	34	20	35	0,02	300	1		30	20	35	0,02	200	1	
	35	20	35	0,02	300	2		31	20	35	0,02	200	2	
	36	20	35	0,02	300	3		32	20	35	0,02	200	3	
	37	20	35	0,02	300	4		33	20	35	0,02	200	4	
	38	20	35	0,02	300	5		34	20	35	0,02	300	1	
	39	20	35	0,03	50	1		35	20	35	0,02	300	2	
	40	20	35	0,03	50	2		36	20	35	0,02	300	3	
	41	20	35	0,03	100	1		37	20	35	0,02	300	4	
	42	20	35	0,03	100	2		38	20	35	0,02	300	5	
	43	20	35	0,03	100	3		39	20	35	0,03	50	1	
	44	20	35	0,03	200	1		40	20	35	0,03	50	2	
	45	20	35	0,03	200	2		41	20	35	0,03	100	1	
	46	20	35	0,03	200	3		42	20	35	0,03	100	2	
Строка	№	F	P	L	V	n	24	43	20	35	0,03	100	3	
23	1	20	35	0,01	50	1		44	20	35	0,03	200	1	
	2	20	35	0,01	50	2		45	20	35	0,03	200	2	
	3	20	35	0,01	100	1		46	20	35	0,03	200	3	
	4	20	35	0,01	100	2		Строка	№	F	P	L	V	n
	5	20	35	0,01	100	3		1	20	30	0,005	20	1	
	6	20	35	0,01	200	1		2	20	30	0,005	30	1	
	7	20	35	0,01	200	2		3	20	30	0,005	35	1	
	8	20	35	0,01	200	3		4	20	30	0,005	40	1	
	9	20	35	0,01	200	4		5	20	30	0,005	45	1	
	10	20	35	0,01	300	1		6	20	30	0,005	50	1	
	11	20	35	0,01	300	2		7	20	30	0,005	55	1	
	12	20	35	0,01	300	3		8	20	30	0,005	60	1	
	13	20	35	0,01	300	4		9	20	30	0,005	70	1	
	14	20	35	0,01	300	5	10	20	30	0,005	75	1		
	15	20	35	0,01	400	1	11	20	30	0,005	70	1		
	16	20	35	0,01	400	2	12	20	30	0,005	85	1		
	17	20	35	0,01	400	3	13	20	30	0,005	90	1		
	18	20	35	0,01	400	4	14	20	30	0,005	95	1		
	19	20	35	0,01	400	5	15	20	30	0,005	100	1		
	20	20	35	0,01	500	1	16	20	30	0,005	105	1		
	21	20	35	0,01	500	2	17	20	30	0,005	110	1		
	22	20	35	0,01	500	3	18	20	30	0,005	115	1		
	23	20	35	0,01	500	4	19	20	30	0,005	120	1		
	24	20	35	0,01	500	5	20	20	30	0,01	20	1		
	25	20	35	0,02	50	1	21	20	30	0,01	25	1		
	26	20	35	0,02	50	2	22	20	30	0,01	30	1		
	27	20	35	0,02	100	1	23	20	30	0,01	35	1		
	28	20	35	0,02	100	2	24	20	30	0,01	40	1		

Продолжение таблицы П 2.1.

Строка	№	F	P	L	V	n	Строка	№	F	P	L	V	n
24	25	20	30	0,01	45	1	25	13	20	30	0,005	90	2
	26	20	30	0,01	50	1		14	20	30	0,005	95	2
	27	20	30	0,01	55	1		15	20	30	0,005	100	2
	28	20	30	0,01	60	1		16	20	30	0,005	105	2
	29	20	30	0,01	65	1		17	20	30	0,005	110	2
	30	20	30	0,01	70	1		18	20	30	0,005	115	2
	31	20	30	0,01	75	1		19	20	30	0,005	120	2
	32	20	30	0,01	80	1		20	20	30	0,01	20	2
Строка	№	F	P	L	V	n		21	20	30	0,01	25	2
25	1	20	30	0,005	20	2		22	20	30	0,01	30	2
	2	20	30	0,005	30	2		23	20	30	0,01	35	2
	3	20	30	0,005	35	2		24	20	30	0,01	40	2
	4	20	30	0,005	40	2		25	20	30	0,01	45	2
	5	20	30	0,005	45	2		26	20	30	0,01	50	2
	6	20	30	0,005	50	2		27	20	30	0,01	55	2
	7	20	30	0,005	55	2		28	20	30	0,01	60	2
	8	20	30	0,005	60	2		29	20	30	0,01	65	2
	9	20	30	0,005	70	2		30	20	30	0,01	70	2
	10	20	30	0,005	75	2		31	20	30	0,01	75	2
	11	20	30	0,005	70	2		32	20	30	0,01	80	2
	12	20	30	0,005	85	2							

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Результаты измерения элементов изображения поверхности образцов, обработанных лазерным излучением

Таблица П 3.1 – Измерение зон лазерного и термического воздействия на исследуемых образцах

Образец №1										
Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	5,965	5,965	6,211	5,965	4,928	4,92	5,535	5,412	6,4575	4,981
ЗТВ	20,11	19,372	19,003	19,311	22,201	21,7095	19,864	18,388	21,463	21,094
X̄ по ЗЛВ – 5,6342					X̄ по ЗТВ – 20,25195					
σ по ЗЛВ – 0,56119					σ по ЗТВ – 1,289399					
Образец №2										
Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	5,211	5,166	4,4895	4,6445	4,0585	4,583	4,797	4,182	4,551	4,198
ЗТВ	22,017	25,83	28,351	27,121	27,0605	25,953	26,629	25,215	26,875	26,0145
X̄ по ЗЛВ – 4,5881					X̄ по ЗТВ – 26,1068					
σ по ЗЛВ – 0,39131					σ по ЗТВ – 1,682343					
Образец №3										
Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	4,182	4,2435	3,2595	3,3825	3,018	2,706	3,075	3,7515	3,0135	2,7675
ЗТВ	23,431	20,233	20,356	22,996	23,124	20,110	22,755	22,939	23,431	21,892
X̄ по ЗЛВ – 3,3399					X̄ по ЗТВ – 22,1271					
σ по ЗЛВ – 0,549052					σ по ЗТВ – 1,37636					
Образец №4										
Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,444	3,567	3,813	3,3825	3,936	4,1045	3,44	2,891	4,182	4,486
ЗТВ	20,418	21,894	21,402	22,447	21,279	21,279	22,14	23,001	21,340	21,528

Продолжение таблицы П 3.1

$\bar{X}$ по ЗЛВ – 3,725						$\bar{X}$ по ЗТВ – 21,6729				
σ по ЗЛВ – 0,469231						σ по ЗТВ – 0,724253				
Образец №5										
Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,136	2,952	2,46	3,198	2,952	2,644	4,059	2,521	2,952	2,767
ЗТВ	21,341	22,939	24,415	20,049	24,415	23,001	20,787	22,755	23,247	24,784
$\bar{X}$ по ЗЛВ – 2,9643						$\bar{X}$ по ЗТВ – 22,77345				
σ по ЗЛВ – 0,456373						σ по ЗТВ – 1,604261				
Образец №6										
Номер замера	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	2,7675	2,829	2,952	3,013	3,3825	3,567	2,1525	2,2755	2,521	2,398
ЗТВ	23,677	25,522	21,033	22,693	23,37	19,618	23,800	23,493	23,308	21,402
$\bar{X}$ по ЗЛВ – 2,78595						$\bar{X}$ по ЗТВ – 22,7919				
σ по ЗЛВ – 0,463001						σ по ЗТВ – 1,6818				
Образец №7										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,891	2,091	1,5375	1,7835	2,6445	1,5375	1,783	1,599	1,722	1,7835
ЗТВ	21,648	23,862	26,506	22,693	23,493	24,784	25,215	20,971	25,153	26,568
$\bar{X}$ по ЗЛВ – 1,8372						$\bar{X}$ по ЗТВ 24,0896				
σ по ЗЛВ – 0,329536						σ по ЗТВ 1,912156				
Образец №8										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,652	1,722	2,214	1,291	1,660	1,845	2,767	1,722	1,722	1,722
ЗТВ	25,707	22,078	24,477	23,739	23,739	23,431	22,570	23,247	26,322	23,431
$\bar{X}$ по ЗЛВ – 1,8319						$\bar{X}$ по ЗТВ – 23,8743				
σ по ЗЛВ – 0,397691						σ по ЗТВ – 1,310654				
Образец №9										
Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	2,128	1,107	1,722	1,7835	1,476	1,66	2,214	1,599	1,845	2,337
ЗТВ	23,001	24,046	23,001	25,661	23,001	23,001	24,231	24,292	20,602	25,584
X̄ по ЗЛВ – 1,7872					X̄ по ЗТВ – 23,70215					
σ по ЗЛВ – 0,368125					σ по ЗТВ – 1,325736					
Образец №12										
Номер образца	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,7195	3,198	3,505	2,275	3,227	2,214	2,644	3,628	2,644	3,198
ЗТВ	18,45	23,493	22,693	20,541	22,386	23,677	21,279	22,816	23,124	23,985
X̄ по ЗЛВ – 3,02555					X̄ по ЗТВ – 22,24455					
σ по ЗЛВ – 0,546434					σ по ЗТВ – 1,706075					
Образец №13										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,3567	4,059	2,9505	3,6285	3,567	3,222	3,628	3,214	3,357	3,091
ЗТВ	18,265	21,033	22,756	22,755	23,247	22,386	26,014	25,030	23,247	23,124
X̄ по ЗЛВ – 3,4465					X̄ по ЗТВ – 22,7859					
σ по ЗЛВ – 0,3125846					σ по ЗТВ – 2,099472					
Образец № 14										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	5,195	5,1795	7,195	7,441	6,088	6,211	5,851	6,273	5,995	5,473
ЗТВ	19,741	17,527	17,712	18,757	18,265	18,757	18,425	19,741	18,265	20,295
X̄ по ЗЛВ – 6,0905					X̄ по ЗТВ – 18,74885					
σ по ЗЛВ – 0,912891					σ по ЗТВ – 0,912891					
Образец №15										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	4,719	5,289	6,642	5,497	5,4575	4,535	5,781	5,904	4,612	5,473
ЗТВ	18,327	20,725	20,541	19,434	19,741	20,049	20,295	19,372	21,402	20,652
X̄ по ЗЛВ – 5,39115					X̄ по ЗТВ – 19,9875					
σ по ЗЛВ – 0,650039					σ по ЗТВ – 0,89809					
Образец №16										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	3,612	3,658	3,567	2,890	4,120	3,136	2,890	3,567	2,46	4,305
ЗТВ	17,712	21,586	23,554	20,172	22,509	22,447	22,263	23,124	22,201	3,0135
X̄ по ЗЛВ – 3,42075					X̄ по ЗТВ – 19,85835					
σ по ЗЛВ – 0,5748					σ по ЗТВ – 6,15331					
Образец №17										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	5,0725	4,134	5,412	4,243	4,858	4,305	5,227	4,781	5,342	5,580
ЗТВ	19,495	23,124	21,279	19,188	20,971	21,217	19,434	20,541	19,618	20,602
X̄ по ЗЛВ – 4,8957					X̄ по ЗТВ – 20,54715					
σ по ЗЛВ – 0,521271					σ по ЗТВ – 1,1195503					
Образец №18										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	4,92	4,674	4,735	5,227	4,305	4,428	5,166	6,211	5,412	6,457
ЗТВ	20,725	21,525	20,541	19,434	21,279	22,324	17,958	19,065	20,049	19,311
X̄ по ЗЛВ – 5,1537					X̄ по ЗТВ – 20,2212					
σ по ЗЛВ – 0,714742					σ по ЗТВ – 1,313856					
Образец №19										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	2,152	2,091	1,476	1,0455	1,291	0,922	1,906	1,845	1,476	1,537
ЗТВ	25,461	25,276	21,771	25,030	26,937	23,001	24,601	24,354	23,801	23,801
X̄ по ЗЛВ – 1,5744					X̄ по ЗТВ – 24,4032					
σ по ЗЛВ – 0,420325					σ по ЗТВ – 1,42819					
Образец №20										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,045	1,107	2,398	1,107	1,0455	0,984	0,984	1,414	1,722	1,23
ЗТВ	26,691	24,846	21,525	24,354	25,830	23,554	25,030	25,461	24,108	23,001
X̄ по ЗЛВ – 1,3038					X̄ по ЗТВ – 24,4401					
σ по ЗЛВ – 0,448008					σ по ЗТВ – 1,491634					
Образец №21										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	1,168	1,295	1,722	2,599	2,599	2,276	2,275	1,537	1,353	1,291
ЗТВ	25,645	25,399	24,169	23,062	24,784	21,525	25,399	24,354	23,923	23,739
X̄ по ЗЛВ – 1,81135					X̄ по ЗТВ – 24,20025					
σ по ЗЛВ – 0,569495					σ по ЗТВ – 1,250416					
Образец №22										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ										
ЗТВ	27,183	25,953	26,199	24,538	24,477	29,151	25,645	24,846	26,014	26,076
X̄ по ЗЛВ –					X̄ по ЗТВ – 26,00835					
σ по ЗЛВ –					σ по ЗТВ – 1,385973					
Образец №23										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	0,861	0,984	0,922	1,738	2,291	2,091	1,291	1,173	1,107	1,722
ЗТВ	22,755	24,723	24,477	25,953	25,276	23,739	24,538	24,718	24,538	24,984
X̄ по ЗЛВ – 1,4182					X̄ по ЗТВ – 24,5703					
σ по ЗЛВ – 0,508625					σ по ЗТВ – 0,857911					
Образец №24										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,6605	2,583	1,414	2,104	3,628	2,952	3,567	2,644	1,360	1,660
ЗТВ	23,37	25,707	22,942	21,279	21,771	21,955	24,723	23,116	21,955	24,354
X̄ по ЗЛВ – 2,3575					X̄ по ЗТВ – 23,1174					
σ по ЗЛВ – 0,848798					σ по ЗТВ – 1,445302					
Образец №25										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,660	1,476	1,476	1,230	1,414	1,845	1,353	1,476	0,6765	1,653
ЗТВ	26,752	22,324	24,046	24,354	23,862	24,046	24,661	25,522	23,739	23,247
X̄ по ЗЛВ – 1,39605					X̄ по ЗТВ – 24,2556					
σ по ЗЛВ – 0,305512					σ по ЗТВ – 1,214251					
Образец №26										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	1,537	1,537	0,676	1,906	1,906	0,922	1,599	0,952	1,291	0,984
ЗТВ	22,632	24,538	24,969	22,693	23,185	24,477	26,260	22,848	24,907	25,399
X̄ по ЗЛВ – 1,3314					X̄ по ЗТВ – 24,1911					
σ по ЗЛВ – 0,432047					σ по ЗТВ – 1,271577					
Образец №28										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	0,984	0,799	0,615	1,292	1,115	1,115	1,238	0,696	1,030	1,107
ЗТВ	21,955	21,525	19,987	19,926	19,065	19,180	18,511	21,217	19,68	19,557
X̄ по ЗЛВ – 1,02655					X̄ по ЗТВ – 20,06055					
σ по ЗЛВ – 0,200953					σ по ЗТВ – 1,138272					
Образец №29										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,722	1,414	1,599	1,291	1,722	1,414	1,045	1,353	1,476	1,720
ЗТВ	18,019	19,003	18,880	19,003	18,081	19,343	21,771	17,835	18,081	19,559
X̄ по ЗЛВ – 1,4758					X̄ по ЗТВ – 18,9668					
σ по ЗЛВ – 0,220545					σ по ЗТВ – 1,16382					
Образец №30										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,537	1,599	1,722	2,275	1,599	1,968	1,722	1,414	0,809	1,136
ЗТВ	19,126	15,559	19,065	18,573	19,372	17,773	19,987	21,085	15,805	20,295
X̄ по ЗЛВ – 1,5783					X̄ по ЗТВ – 18,6643					
σ по ЗЛВ – 0,407651					σ по ЗТВ – 1,818423					
Образец №31										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,1685	1,845	0,922	1,9065	1,722	1,291	1,476	1,168	1,414	1,660
ЗТВ	20,295	19,434	16,236	19,126	18,511	18,696	21,955	18,327	19,249	18,880
X̄ по ЗЛВ – 1,45755					X̄ по ЗТВ – 19,07115					
σ по ЗЛВ – 0,324198					σ по ЗТВ – 1,455486					
Образец №32										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	4,366	4,059	3,321	3,382	3,690	4,043	4,227	3,136	4,243	4,243
ЗТВ	17,405	17,466	16,359	16,666	17,113	17,179	16,928	19,420	15,006	17,477
X̄ по ЗЛВ – 3,8713					X̄ по ЗТВ – 16,79387					
σ по ЗЛВ – 0,450732					σ по ЗТВ – 0,748727					
Образец №33										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,075	2,214	2,460	2,706	3,997	3,259	3,690	2,583	2,952	4,120
ЗТВ	18,388	17,220	17,097	18,942	16,851	17,773	19,912	16,297	17,281	18,001
X̄ по ЗЛВ – 3,10575					X̄ по ЗТВ – 17,41817					
σ по ЗЛВ – 0,654878					σ по ЗТВ – 0,820384					
Образец №34										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,382	2,214	2,952	2,583	2,152	3,013	2,275	3,612	3,444	2,829
ЗТВ	19,680	19,249	17,281	16,543	19,065	16,420	19,864	17,297	17,405	16,851
X̄ по ЗЛВ – 2,84585					X̄ по ЗТВ – 17,96575					
σ по ЗЛВ – 0,532034					σ по ЗТВ – 1,345085					
Образец №35										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,845	1,845	1,23	1,414	2,521	2,152	2,091	1,660	2,890	2,829
ЗТВ	18,511	17,958	18,327	19,680	19,065	18,081	18,388	17,835	17,589	19,188
X̄ по ЗЛВ – 2,04795					X̄ по ЗТВ – 18,4623					
σ по ЗЛВ – 0,563694					σ по ЗТВ – 0,662883					
Образец №36										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,537	1,353	0,676	1,476	1,353	1,107	1,599	1,476	1,414	1,968
ЗТВ	20,848	19,065	17,466	20,479	20,725	19,065	19,327	18,019	18,511	18,696
X̄ по ЗЛВ – 1,39605					X̄ по ЗТВ – 19,12035					
σ по ЗЛВ – 0,334408					σ по ЗТВ – 1,180647					
Образец №37										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	5,043	5,965	5,719	4,567	5,658	5,275	5,017	5,321	5,628	5,551
ЗТВ	15,222	15,744	15,867	16,851	16,851	19,676	16,974	16,789	17,511	17,869
X̄ по ЗЛВ – 5,37465					X̄ по ЗТВ – 16,9356					
σ по ЗЛВ – 0,414515					σ по ЗТВ – 1,258186					
Образец №38										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	5,781	5,166	4,7355	4,551	4,981	4,370	4,912	4,265	4,912	4,152
ЗТВ	15,006	16,051	15,067	16,666	15,129	17,644	17,013	19,013	20,880	17,847
X̄ по ЗЛВ – 4,7828					X̄ по ЗТВ – 17,032					
σ по ЗЛВ – 0,483922					σ по ЗТВ – 1,899068					
Образец №39										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	4,428	4,120	4,444	4,981	3,874	4,350	4,088	5,719	4,350	4,412
ЗТВ	16,728	15,928	17,466	16,605	15,498	17,022	17,559	16,345	17,051	16,960
X̄ по ЗЛВ – 4,47695					X̄ по ЗТВ – 16,71645					
σ по ЗЛВ – 0,524836					σ по ЗТВ – 0,64922					
Образец №40										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	4,211	4,382	5,043	5,043	3,751	4,366	4,981	5,658	3,936	4,92
ЗТВ	15,683	16,543	16,174	16,420	16,174	15,992	15,067	15,559	16,297	17,035
X̄ по ЗЛВ – 4,6293					X̄ по ЗТВ – 16,09485					
σ по ЗЛВ – 0,593019					σ по ЗТВ – 0,554583					
Образец №41										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	5,658	5,3505	4,674	5,535	4,489	4,920	3,842	4,519	4,842	4,781
ЗТВ	15,744	13,714	16,297	15,805	15,559	16,669	16,129	17,575	15,452	15,329
X̄ по ЗЛВ – 4,8612					X̄ по ЗТВ – 15,82765					
σ по ЗЛВ – 0,544325					σ по ЗТВ – 1,00045					
Образец №42										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	5,781	5,043	5,596	5,350	4,489	5,412	4,797	5,043	4,551	4,674
ЗТВ	15,375	14,883	15,252	16,912	15,760	16,851	13,776	16,789	15,669	16,174
X̄ по ЗЛВ – 5,07375					X̄ по ЗТВ – 15,74425					
σ по ЗЛВ – 0,449366					σ по ЗТВ – 0,992622					
Образец №43										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,8905	3,227	3,444	2,644	3,813	2,829	3,043	3,290	3,735	3,674
ЗТВ	15,867	17,466	17,650	19003	15,436	17,821	16,435	17,297	16,621	16,605
X̄ по ЗЛВ – 3,3915					X̄ по ЗТВ – 17,02035					
σ по ЗЛВ – 0,428182					σ по ЗТВ – 1,041402					
Образец №44										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	4,612	4,366	3,321	3,259	3,505	4,829	3,567	5,166	5,965	4,797
ЗТВ	16,420	17,712	16,666	18,327	16,051	16,666	15,129	16,728	15,129	16,022
X̄ по ЗЛВ – 4,33895					X̄ по ЗТВ – 16,4852					
σ по ЗЛВ – 0,903524					σ по ЗТВ – 1,0005946					
Образец №45										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	2,952	2,644	2,521	2,706	2,767	2,460	2,952	1,444	3,120	2,698
ЗТВ	18,019	16,420	19,618	16,420	18,880	18,880	16,006	17,805	17,666	17,613
X̄ по ЗЛВ – 2,6266					X̄ по ЗТВ – 17,7331					
σ по ЗЛВ – 0,462436					σ по ЗТВ – 1,18896					
Образец №46										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,353	1,660	1,722	1,968	1,722	1,599	1,858	1,321	2,829	1,997
ЗТВ	17,835	19,864	20,233	18,142	19,557	18,081	17,944	17,773	18,543	19,220
X̄ по ЗЛВ – 1,80305					X̄ по ЗТВ – 18,7195					
σ по ЗЛВ – 0,42566					σ по ЗТВ – 0,919214					
Образец №47										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	1,599	2,398	1,722	1,660	1,476	2,029	1,845	1,751	2,013	3,690
ЗТВ	18,019	19,372	16,912	18,142	20,725	18,573	19,188	17,404	16,297	17,035
X̄ по ЗЛВ – 2,01855					X̄ по ЗТВ – 18,1671					
σ по ЗЛВ – 0,643447					σ по ЗТВ – 1,339954					
Образец №49										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	4,854	3,628	3,813	4,013	3,628	4,735	4,551	4,583	4,933	5,195
ЗТВ	17,716	16,174	19,495	16,174	16,867	17,035	17,773	17,209	17,546	18,795
X̄ по ЗЛВ – 4,39365					X̄ по ЗТВ – 17,4787					
σ по ЗЛВ – 0,575117					σ по ЗТВ – 1,053798					
Образец №50										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,874	4,612	4,920	4,829	3,505	3,444	4,842	5,503	4,904	4,703
ЗТВ	16,482	15,375	17,343	17,281	18,081	14,883	13,591	15,530	17,466	15,853
X̄ по ЗЛВ – 4,51385					X̄ по ЗТВ – 16,18865					
σ по ЗЛВ – 0,676489					σ по ЗТВ – 1,39378					
Образец №51										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	3,813	4,674	3,936	4,305	3,936	3,567	3,350	3,503	4,032	4,455
ЗТВ	17,022	17,158	17,498	19,495	17,944	17,343	17,161	18,733	18,094	18,455
X̄ по ЗЛВ – 3,95715					X̄ по ЗТВ – 17,8905					
σ по ЗЛВ – 0,426419					σ по ЗТВ – 0,811386					
Образец №52										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	4,043	2,813	3,366	4,166	4,243	4,781	4,289	4,428	4,059	4,583
ЗТВ	16,883	18,543	18,912	16,698	17,682	17,990	17,006	18,359	17,926	16,455
X̄ по ЗЛВ – 4,0772					X̄ по ЗТВ – 17,6456					
σ по ЗЛВ – 0,583041					σ по ЗТВ – 0,844852					
Образец №54										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

Продолжение таблицы П 3.1

ЗЛВ	2,952	3,874	2,767	3,874	3,690	3,366	3,075	3,874	3,933	3,247
ЗТВ	16,605	17,158	15,436	19,003	16,543	17,773	18,019	16,238	17,546	17,770
X по ЗЛВ – 3,46555					X по ЗТВ – 17,20945					
σ по ЗЛВ – 0,438681					σ по ЗТВ – 1,028374					
Образец №55										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	2,829	2,214	3,690	2,644	2,644	3,075	3,075	3,628	2,952	4,247
ЗТВ	18,038	18,573	18,204	19,065	18,265	17,035	17,404	16,359	17,035	17,770
X по ЗЛВ – 3,1					X по ЗТВ – 17,775					
σ по ЗЛВ – 0,600067					σ по ЗТВ – 0,818588					
Образец №56										
Номер	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ЗЛВ	1,230	2,890	1,599	2,337	1,291	2,460	2,460	1,735	2,005	2,300
ЗТВ	18,450	18,081	19,987	17,404	19,188	18,313	18,450	14,402	18,215	17,950
X по ЗЛВ – 2,03085					X по ЗТВ – 18,04415					
σ по ЗЛВ – 0,551352					σ по ЗТВ – 1,460624					