

На правах рукописи

Дранова Алина Юрьевна



**ФОРМИРОВАНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ ОКСИДНЫХ
ОБРАЗОВАНИЙ
НА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЯХ ПРИ ПРЯМОЙ
ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКЕ**

Специальность 2.6.17. Материаловедение

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Санкт-Петербург – 2026

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пряхин Евгений Иванович

Официальные оппоненты:

Атрошенко Светлана Алексеевна

доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем машиноведения Российской академии наук, лаборатория физики разрушения, ведущий научный сотрудник;

Бобкова Татьяна Игоревна

кандидат технических наук, федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов «Прометей» имени И.В. Горынина Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», служба учёного секретаря, учёный секретарь.

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет», г. Санкт-Петербург.

Защита диссертации состоится **25 сентября 2026 г. в 12:00** на заседании диссертационного совета ГУ.9 Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я В.О. линия, д.2, **аудитория № 1163.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета императрицы Екатерины II и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 24 июля 2026 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЕФИМОВ
Александр Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Маркировка изделий является обязательным элементом современного машиностроительного производства и служит для идентификации продукции, обеспечения ее прослеживаемости на всех стадиях жизненного цикла, защиты от подделок и регистрации технологической информации. Как правило, для них применяется прямая лазерная маркировка, то есть нанесение кодов непосредственно на металлическую поверхность изделий.

На сегодняшний день активно применяется прямая лазерная маркировка с традиционными видами двумерных матричных кодов (DataMatrix и QR-коды), которые обеспечивают информационную емкость от 500 до 1000 символов с высоким разрешением. Однако для маркировки продукции в некоторых областях промышленности требуется запись с использованием кодов большого объема информации, что возможно только при использовании кодов с более плотной записью информации. Для этой цели был разработан нанобар-код (далее — НБК) с ультраплотной записью информации до 5000 символов. Это, соответственно, требует принципиальных изменений в подходе к условиям получения таких кодов при прямой лазерной маркировке машиностроительных изделий.

Попытки нанесения плотных и ультраплотных кодов на металлические поверхности, их считывание и идентификация вызывали проблемы из-за малококонтрастного изображения кода, либо из-за пережигания поверхности лазером.

Настоящая работа представляет собой всестороннее исследование особенностей прямой лазерной маркировки с использованием разных видов кодов, применительно к четырем разным группам наиболее широко применяемых в промышленности сплавов: стали – коррозионностойкая сталь 12Х18Н10Т, титан - ВТ1, латунь – Л63 и алюминий - АМг. Выбор указанных групп материалов основан на том, что для каждой из них должны применяться принципиально разные значения параметров лазера для получения наилучшего контрастного изображения кода. Для ультраплотных кодов с очень малыми ячейками (модулями) важно формирование при лазерной маркировке контрастных чёрных цветов, которые

наряду с белым фоном подложки будут обеспечивать надежное гарантированное считывание НБК. В связи с этим, важной задачей по формированию контрастного кода, являлось получение насыщенного чёрного цвета при лазерном воздействии на металлическую поверхность, для чего потребовалось изучение механизма формирования оксидов под воздействием лазера.

Степень разработанности темы исследования

Вопросами лазерной обработки различных металлов и металлических сплавов занимались такие отечественные и зарубежные учёные, как В.П. Вейко, С.Г. Горный, А.П. Петкова, О.Ю. Ганзуленко. Эти работы определили основные принципы взаимодействия лазерного излучения с разными металлами, что позволило внедрить лазерную маркировку на машиностроительных предприятиях, однако вопросы формирования оксидных плёночных образований под действием лазера с формированием серо-чёрных цветов в проводимых ранее работах не изучались. Основные исследования были связаны с формированием при лазерном воздействии цветных плёнок.

Объект исследования

Технология получения оксидных плёночных образований, формируемых при лазерной маркировке металлических поверхностей.

Предмет исследования

Механизм формирования плёночных оксидных образований с целью получения устойчивого контрастного чёрного цвета на металлических поверхностях при лазерной маркировке.

Цель работы

Разработка технологии формирования оксидных пленочных образований на поверхностях изделий из металлов и сплавов, обеспечивающей получение контрастных чёрных цветов при прямой лазерной маркировке.

Идея заключается в использовании процесса формирования оксидных плёночных образований на металлических поверхностях при лазерной маркировке, обеспечивающих получение контрастного чёрного цвета для нанесения и считывания плотных и ультраплотных кодов.

Задачи исследования

1. Провести анализ современного состояния исследований в области прямой лазерной маркировки на металлических поверхностях и обосновать недостаточную изученность механизмов формирования высококонтрастных чёрных оксидных плёнок, обеспечивающих получение высококонтрастных изображений для надёжного машинного считывания плотных и ультраплотных кодов;
2. Исследовать физические основы взаимодействия лазерного излучения с металлическими поверхностями и выявить закономерности изменения оптического состояния поверхности при варьировании теплового вклада;
3. Определить количественные зависимости толщины поверхностного оксидного слоя от параметров лазерной обработки и установить пороговые режимы, обеспечивающие формирование контрастного чёрного цвета;
4. Выявить структурные особенности поверхностного оксидного слоя в зависимости от применяемых режимов лазерного воздействия и установить влияние получаемых характерных структурных состояний на способность к поглощению и отражению светового потока;
5. Определить фазовый состав оксидных плёночных образований изучаемых металлов и сплавов при разных параметрах и режимах лазерного воздействия;
6. Разработать режимы лазерной маркировки, обеспечивающие контрастное нанесение кодов на поверхности изучаемых металлов и сплавов;
7. Оценить влияние геометрических характеристик модулей кода на качество декодирования и установить допустимые пределы искажения контуров модулей для надёжного считывания.

Методы исследования

1. Применение метода рентгенофлуоресцентной спектromетрии (РФС) для определения химического состава всех использованных сплавов;
2. Проведение прямой лазерной маркировки на опытных пластинах размером 100x50 мм из всех выбранных сталей и сплавов с

использованием лазерной установки «МиниМаркер-2» ($\lambda = 1064$ нм, $P \leq 30$ Вт);

3. Применение многофакторного плана эксперимента (мощность, скорость, частота, длительность импульса, линиятура);

4. Использование металлографической микроскопии для измерения толщины сформированного на поверхности оксидного слоя (Phenom ProX);

5. Рентгенофазовый анализ (РФА) контрастных режимов обработанной поверхности с целью идентификации оксидных фаз (Rigaku Ultima IV);

6. Применение цифровой обработки получаемых изображений с использованием RGB-анализа и путем расчёта контрастности получаемых кодов;

7. Использование оптической микроскопии для анализа морфологии модулей получаемых кодов.

Научная новизна

1. Установлены 4 стадии формирования оксидных образований при лазерном воздействии на металлические поверхности изделий в процессе маркировки:

- Зона тонких однофазных оксидных плёнок при малом тепловом воздействии;

- Зона утолщенных однофазных оксидных плёночных образований при умеренном тепловом воздействии;

- Зона многофазных оксидно-металлических образований при нормальном тепловом воздействии;

- Зона разьединенных пористых утолщенных оксиднометаллизированных комплексов при высоком тепловом воздействии.

2. С варьированием параметров лазерной установки (мощность, скорость, длительность импульса) закономерно изменяется толщина оксидных образований, что приводит к разной степени поглощения светового потока и соответственно к переходу цвета при лазерной маркировке от серого к чёрному.

Соответствие паспорту специальности

Полученные научные результаты соответствуют паспорту специальности 2.6.17. Материаловедение (технические науки) по

пунктам: п. 2. «Установление закономерностей физико-химических процессов, происходящих в гетерогенных и композиционных структурах» и п. 11. «Разработка функциональных покрытий различного назначения и методов управления их свойствами и качеством».

Теоретическая и практическая значимость

1. Сформулированы теоретические положения, определяющие возможность получения контрастного чёрного цвета при прямой лазерной маркировке на металлических поверхностях за счёт формирования оптимальных толщин и структуры оксидных образований на поверхности, обеспечивающих максимальное поглощение падающего светового потока.

2. Установлена зависимость между параметрами лазера и процессом формирования контрастного чёрного цвета, позволяющая определять оптимальные режимы маркировки разных металлов и сплавов с использованием плотных и ультраплотных кодов.

3. Предложены технологические режимы оптимальной маркировки металлических изделий с использованием плотных и ультраплотных кодов, обеспечивающие размещение большого объёма информации и надёжное считывание.

4. Материалы диссертации приняты к внедрению в ООО «Лазерный центр» (акт от 13.05.2026, утверждён Генеральным директором Горным С.Г.) в виде рекомендаций по выбору режимов параметров лазерного воздействия при нанесении контрастной маркировки для плотных и ультраплотных кодов.

5. Зарегистрирована база данных «База данных параметров лазерной маркировки конструкционных цветных металлов на основе двумерной матрицы», что подтверждается свидетельством о государственной регистрации базы данных №2026622478 Российской Федерации от 29.05.2026.

Положения, выносимые на защиту

1. Воздействие на поверхность образцов из легированной стали и сплавов на основе титана, алюминия и меди лазером с варьированием параметров мощности, скорости и длительности импульса позволяет формировать у них модифицированный поверхностный слой толщиной от 30 до 76 мкм с наличием

комплексных оксидов, в зависимости от химсостава маркируемого материала, и обеспечивающий, за счёт полного поглощения светового потока, получение насыщенных чёрных цветов при маркировке.

2. Надёжное считывание и декодирование плотных идентификационных кодов не менее 90%, формируемых при прямой лазерной маркировке на металлических поверхностях, достигается при получении контрастного чёрного цвета и правильных геометрических параметров модулей кодов.

Степень достоверности результатов исследования обусловлена необходимым объёмом методов математического планирования эксперимента, использованием стандартных методов исследований, достаточным объёмом экспериментальных исследований на сертифицированном и поверенном оборудовании, а также апробацией результатов исследований на всероссийских и международных конференциях и публикациях в рецензируемых изданиях.

Апробация результатов диссертации проведена на 4 научнопрактических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных. За последние 3 года принято участие в 4 научно-практических мероприятиях с докладами, в том числе на 3 международных:

III Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы науки и образования» (г. Петрозаводск, март 2026 года);

XI Международная научно-практическая конференция «Человек, общество, технологии: актуальные вопросы взаимодействия» (г. Петрозаводск, март 2026 года);

III Всероссийский научный форум студентов и учащихся (г. Петрозаводск, май 2026 года);

XXIX Международная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы современной науки» (г. Пенза, июнь 2026 года).

Личный вклад автора заключается в постановке цели и задач диссертационного исследования, анализе зарубежной и

отечественной научной литературы по теме исследования, проведении экспериментальных исследований.

Публикации

Результаты диссертационного исследования в достаточной степени освещены в 4 печатных работах, в том числе в 2 статьях – в изданиях из перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (далее – Перечень ВАК), в 2 статьях - в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации базы данных.

Структура работы

Диссертация состоит из оглавления, введения, 4 глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 123 наименований и 2 приложений. Диссертация изложена на 129 страницах машинописного текста, содержит 34 рисунка и 18 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационного исследования, сформулированы цель, задачи и научная новизна работы, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор отечественных и зарубежных источников, посвящённых проблематике формирования чёрных оксидных плёнок с высокой контрастностью для машинного считывания, раскрыты теоретическая и практическая значимость исследования и изложены положения, выносимые на защиту. На основании проведённого анализа сформулирована цель и поставлены задачи исследования. По результатам обзора выявлено, что практически отсутствуют исследования, посвящённые формированию чёрных оксидных плёнок с высокой контрастностью для машинного считывания, а также недостаточно изучены закономерности их получения на разных металлах и сплавах.

Во второй главе описаны применяемые материалы, оборудование и методы для проведения экспериментальных исследований.

В третьей главе представлены экспериментальные данные исследований по воздействию лазерного излучения на поверхности исследуемых материалов и формированию в приповерхностной зоне оксидного многокомпонентного модифицированного слоя плёночного типа с толщиной порядка несколько десятков микрометров. Приведены результаты изменения оптического состояния поверхности металлов и сплавов, за счёт образования оксидных плёночных комплексов различного состава и с разной толщиной и структурой, а также обоснован выбор диапазонов параметров лазерной обработки для последующего целенаправленного управления составом и толщиной оксидных плёночных комплексов.

В четвертой главе представлены экспериментальные исследования по установлению взаимосвязи между формированием чёрного цвета, получаемого при лазерной маркировке плотных и ультраплотных кодов и состоянием геометрических параметров их модулей, определяющих в итоге возможность гарантированного обеспечения надёжного декодирования.

В заключении отражены обобщённые выводы по результатам работы.

Основные результаты отражены в следующих защищаемых положениях:

1. Воздействие на поверхность образцов из легированной стали и сплавов на основе титана, алюминия и меди лазером с варьированием параметров мощности, скорости и длительности импульса позволяет формировать у них модифицированный поверхностный слой толщиной от 30 до 76 мкм с наличием комплексных оксидов, в зависимости от химсостава маркируемого материала, и обеспечивающий, за счёт полного поглощения светового потока, получение насыщенных чёрных цветов при маркировке.

Первоначально был обоснован выбор диапазонов варьирования параметров лазерной обработки для качественной

оценки изменения оптического состояния поверхности исследуемых металлов и сплавов, за счёт образования оксидных плёночных комплексов различного состава и с разной толщиной и структурой. Для каждого из исследуемых материалов были получены матрицы оптического состояний поверхности, каждая ячейка которых соответствует определённому сочетанию мощности и скорости воздействия.

После выполнения матричных экспериментов для каждого из исследуемых материалов (рисунок 1) были установлены сокращённые диапазоны параметров лазерной обработки, при которых на поверхности наблюдались признаки формирования серого и чёрного оксидного слоя. Для образцов, полученных в указанных режимах, были изготовлены поперечные пластины, на которые наносились серо-чёрные полосы, формируемые при разных параметрах лазера, что позволило перейти от качественной визуальной оценки состояния поверхности к прямому измерению толщины оксидных плёночных комплексов (рисунок 2).

Из данных пластин изготавливались шлифы поперечных сечений. Реальные типовые микроструктуры, при исследовании полученных шлифов, приведены на рисунке 3.

Для систематизации полученных данных и последующего количественного анализа влияния параметров лазерной обработки на формирование плёночного комплекса, проводили измерения толщины оксидных плёночных комплексов по микрофотографиям поперечных сечений на шлифах. По результатам измерений были построены графики зависимости толщины модифицированного слоя от параметров лазерной обработки (рисунок 4,5,6). Представленные данные позволяют проследить взаимосвязь между режимами обработки и геометрическими характеристиками сформировавшегося слоя.

Для уточнения механизмов формирования и состава оксидных плёночных образований при чёрной маркировке и проверки выводов, сделанных на основе морфологического анализа и измерения толщины, был выполнен рентгенодифракционный анализ (РФА) образцов из латуни Л63, титана ВТ-1, алюминия АМг и стали 12Х18Н10Т (рисунки 7-10).

РФА образцов, обработанных в режимах чёрной маркировки, подтвердил многокомпонентный фазовый характер плёночного комплекса. На титане выявлены набор оксидов различной стехиометрии TiO_x и полиморфные модификации TiO_2 ; на аустенитной стали – сочетание аустенитной матрицы с оксидной шпинелью типа Fe_3O_4 и возможным ферритом; на латуни – твёрдый раствор $Cu-Zn$ в сочетании с интерметаллидом $CuZn$ и оксидом ZnO ; на алюминиевом сплаве – металлическая фаза Al с тонким слабо кристаллизованным оксидным слоем. Эти результаты согласуются с теоретическими представлениями, приводимыми в первой главе, о необходимости присутствия комплексных оксидных систем (TiO_x , Fe_3O_4 , ZnO и др.) для формирования устойчивой чёрной маркировки.

На основании сопоставления полученных микроструктур для всех изучаемых материалов были выделены четыре общих характерных состояния оксидного плёночного комплекса, сформированного в результате лазерного воздействия на поверхность образцов в пределах варьируемых параметрах лазера (рисунок 11):

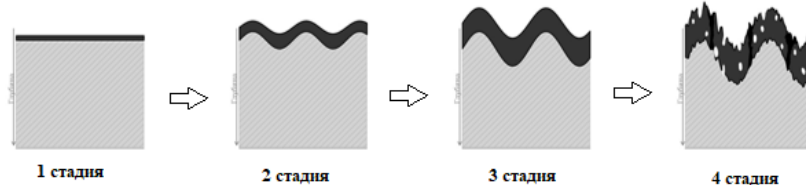


Рисунок 11 - Схема возможных качественных состояний оксидной плёнки при разных режимах обработки поверхности лазером

1. Тонкая, однофазная оксидная плёнка – при малом тепловом воздействии;
2. Утолщенное однофазное плёночное образование – при умеренном тепловом воздействии;
3. Многофазное оксидно-металлическое образование - при нормальном тепловом воздействии;
4. Модифицированная пористая плёнка с нарушением монолитности структуры - при высоком тепловом воздействии;

Таким образом, данные РФА в совокупности с результатами исследования морфологии и толщины плёночного

модифицированного комплекса позволяют сформулировать принципиальную научную концепцию механизма формирования чёрного насыщенного контрастного цвета при лазерной маркировке на изделиях из металлов и сплавов, как следствие формирования пространственно-неоднородного, многослойного и многокомпонентного оксидно-металлического плёночного комплекса. Оптические свойства такого комплекса обусловлены не простой интерференцией в тонкой однофазной оксидной плёнке, как это происходит при формировании цветных классических цветов, а определяются совместным влиянием набора металлических и оксидных фаз различной стехиометрии, толщины модифицированного слоя и развитого поверхностного рельефа.

2. Надёжное считывание и декодирование плотных идентификационных кодов не менее 90%, формируемых при прямой лазерной маркировке на металлических поверхностях, достигается при получении контрастного чёрного цвета и правильных геометрических параметров модулей кодов.

В современных производственных, логистических и сервисных системах маркировка изделий рассматривается не только как средство визуального обозначения объекта, но и как инструмент автоматизированной идентификации и хранения информации.

Как уже отмечалось ранее для записи большого объёма информации с применением лазерной маркировки рекомендуется использовать НБК (рисунок 12).

Для оценки оптических свойств плёночного комплекса у различных плотных и ультраплотных кодов использовали цветовой анализ цифровых изображений в модели RGB.

На основании полученных данных для каждой матрицы режимов формировали таблицы и карты распределения яркости и контраста, позволяющие визуально выделить области с наибольшей контрастностью плёнки. Из этих областей отбирали несколько режимов со значениями яркости при условии, что разность яркости с фоном остаётся на высоком уровне.

После предварительного отбора режимов по результатам RGB-анализа была проведена оценка геометрических характеристик модулей кодов. Для этого в рамках выделенных по яркости и

контрасту зон для каждого материала наносили пробные коды с одинаковой структурой и фиксированным номинальным линейным размером модуля.

Для оценки качества получаемых модулей нанесенных кодов изучали микрофотографии при увеличении $\times 200$. Для каждого режима фиксировали серии микрофотографий, на которых анализировали форму модулей, чёткость и непрерывность их границ, а также состояние плёночного комплекса в области фона и в зоне термического воздействия.

Геометрическую оценку проводили по совокупности морфологических признаков структуры модулей. Чёткость границ модулей количественно оценивали по величине выхода фактического контура за номинальные границы: в качестве допустимого считали отклонение не более 20 % (рисунок 13) от номинального линейного размера модуля по каждой стороне, при котором сохраняется раздельность соседних модулей и обеспечивается устойчивое считывание кода.

На основании анализа морфологии модулей для каждого материала была выделен суженный диапазона режимов лазерной маркировки, в котором обеспечивалось сочетание удовлетворительных геометрических характеристик и оптических параметров. Выбранные режимы использовались для нанесения кодов на поверхности исследуемых образцов с целью проверки на успешность декодируемости. Результаты исследований подтвердили, что сочетание двух условий: высокой оптической контрастности и правильной геометрии модулей увеличивают процент успешных считываний не менее 90%.

Таким образом, совокупность экспериментальных данных позволяет утверждать, что формирование качественного плотного и ультраплотного кодов на металлических поверхностях возможно только при совместном обеспечении двух условий: получении контрастного чёрного плёночного комплекса и сохранении геометрически корректной модульной структуры. Нарушение хотя бы одного из этих условий приводит к ухудшению считываемости кода.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решена актуальная научно-техническая задача, заключающаяся в установлении закономерностей формирования оксидного плёночного комплекса при прямой лазерной маркировке металлических изделий и обосновании условий получения устойчивой чёрной маркировки, пригодной для нанесения ультраплотного кода на металлах и сплавах.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы.

1. Проведённый анализ современных российских и зарубежных исследований по лазерной маркировке металлов показал, что большинство работ направлено на расширение цветовой палитры и декоративную цветную маркировку. Установлено, что практически отсутствуют исследования, посвящённые формированию чёрных оксидных плёнок с высокой контрастностью для машинного считывания, а также недостаточно изучены закономерности их получения на разных металлах и сплавах.

2. Установлено, что при переходе от «мягких» режимов к более «жёстким» возрастает доля оксидных модифицированных пленочных образований, усиливается дефектность, появляется развитый микрорельеф, что приводит к увеличению поглощения и рассеяния света и переходу поверхности к тёмным цветовым состояниям.

3. Проведённые измерения толщины оксидного плёночного комплекса показали, что с ростом теплового вклада лазерного излучения толщина модифицированного слоя возрастает от малых значений, соответствующих тонкой плёнке, до десятков микрометров для режимов, обеспечивающих устойчивую чёрную маркировку.

4. Показано, что при варьировании параметров лазерной обработки их структура поверхностного слоя последовательно проходит четыре характерных состояния: тонкий плёночный комплекс, утолщённый плёночный комплекс, толстый модифицированный слой и пористая плёнка с нарушением структуры. Установлено, что именно состояние толстого модифицированного слоя и переходная зона к нему обеспечивают наибольшую способность к максимальному поглощению светового

потока, что обеспечивает оптический отклик от них в виде черного контрастного цвета.

5. Рентгенодифракционный анализ образцов, обработанных в режимах чёрной маркировки, подтвердил многокомпонентный фазовый характер плёночного комплекса.

6. Доказано, устойчивый чёрный контраст на поверхностях стали и сплавов на основе титана, алюминия и меди достигается при формировании в приповерхностной зоне плёночного комплекса, обладающего разной толщиной, структурой и фазовым составом.

7. Установлено, что правильная форма модулей является необходимым условием надёжной маркировки независимо от типа структуры, а соблюдение этого критерия гарантированно обеспечивает устойчивое декодирование кодов.

Перспективой дальнейших исследований является разработка методов прогнозирования оптических свойств оксидных плёночных комплексов на основе математического моделирования процессов лазерного окисления, что позволит сократить время подбора технологических параметров для новых материалов. Актуальным также представляется распространение разработанной методологии на другие перспективные металлы и сплавы, в том числе высокопрочные алюминиевые и титановые системы, а также изучение возможности применения полученных закономерностей для создания многоцветных защитных маркировочных изображений непосредственно на поверхности изделий.

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Пряхин Е. И. Особенности формирования модульной структуры двумерных кодов высокой плотности при прямой лазерной маркировке на металле / Е. И. Пряхин, А. Ю. Дранова // Дизайн. Материалы. Технология. – 2024. – № 2(74). – С. 184-189. – DOI 10.46418/1990-8997_2024_2(74)_184_189

2. Пряхин Е. И. Определение оптимальных технологических параметров формирования нанобар-кода / Е. И. Пряхин, Е. А.

Косарева, А. Ю. Дранова // Дизайн. Материалы. Технология. – 2025. – № 3(79). – С. 129-135. – DOI 10.46418/1990-8997_2025_3(79)_129_135

Публикации в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования Scopus:

3. Применение композитных пленочных материалов для маркировки машиностроительной продукции / Е. И. Пряхин, Е. Ю. Жданова, Д. М. Шарапова, А. Ю. Дранова // Черные металлы. – 2024. – № 9. – С. 93-98. – DOI 10.17580/chm.2024.09.15.

4. Pryakhin E. I. Application of direct laser marking of products made of different types of alloys using ultra-dense matrix nanobar-code / E. I. Pryakhin, A. Yu. Dranova // CIS Iron and Steel Review. – 2025. – Vol. 30. – pp. 92-98. – DOI 10.17580/cisr.2025.02.15.

Свидетельство о государственной регистрации базы данных:

5. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2026622478 Российская Федерация. База данных параметров лазерной маркировки конструкционных цветных металлов на основе двумерной матрицы. Заявка № 2026622311: заявл. 18.05.2026: опубл. 29.05.2026 / Е. И. Пряхин, А. Ю. Дранова; заявитель/правообладатель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». – 60 КБ. – Текст: непосредственный.

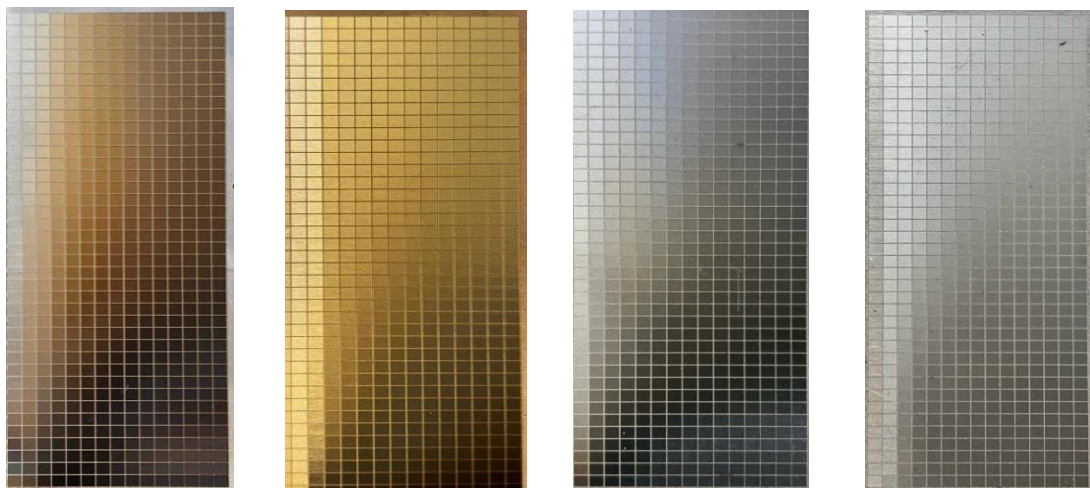


Рисунок 1- Матрицы оптического состояния поверхности:
а)12Х18Н10Т; б)Л63; в)ВТ1-0; г)АМг

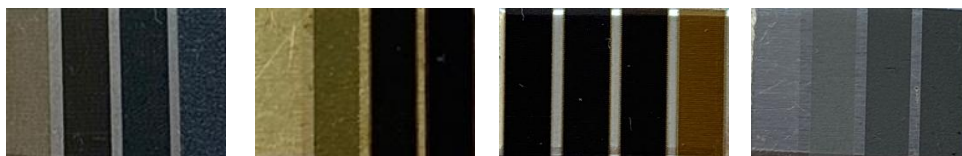


Рисунок 2 - Фото образцов с цветными (серо-чёрными) полосками, полученными при разных значениях параметров лазерной обработки

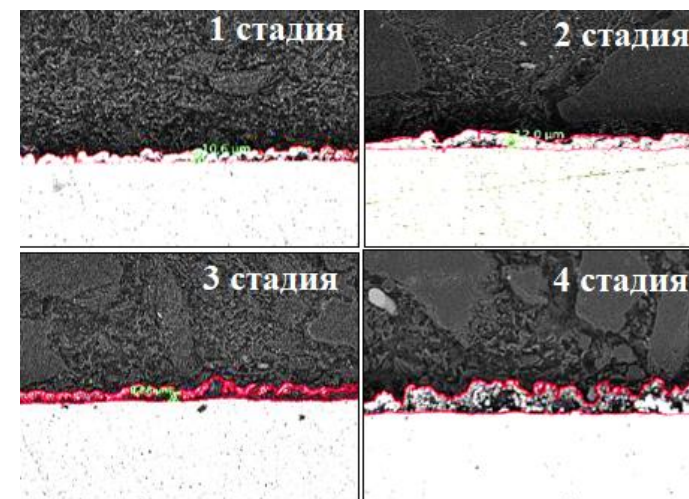


Рисунок 3 - Микрофотографии поперечных сечений шлифов на обработанном лазером образце, с выделенной областью пленки x570

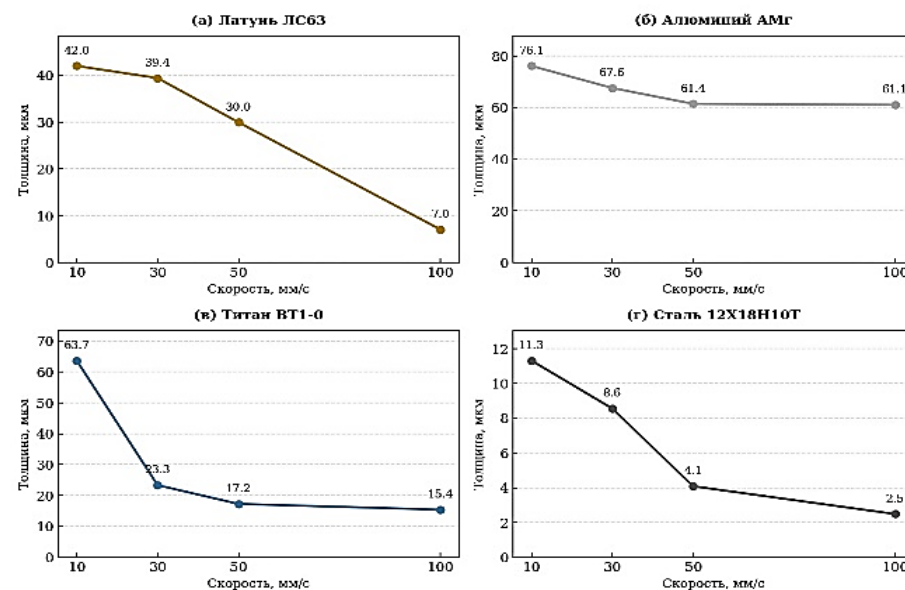


Рисунок 4 - Зависимость толщины пленочного комплекса от скорости лазерного воздействия

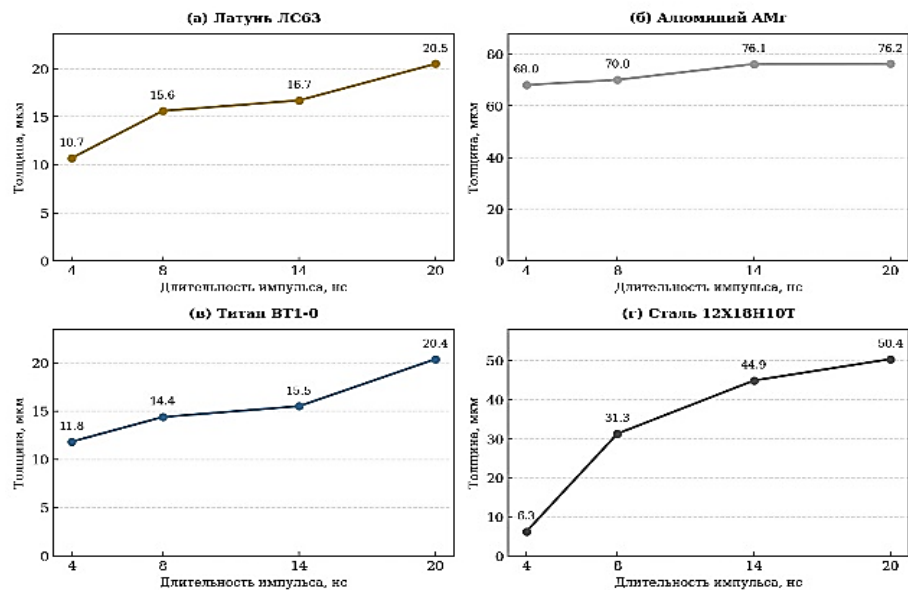


Рисунок 5 - Зависимость толщины пленочного комплекса от длительности импульса лазерного воздействия

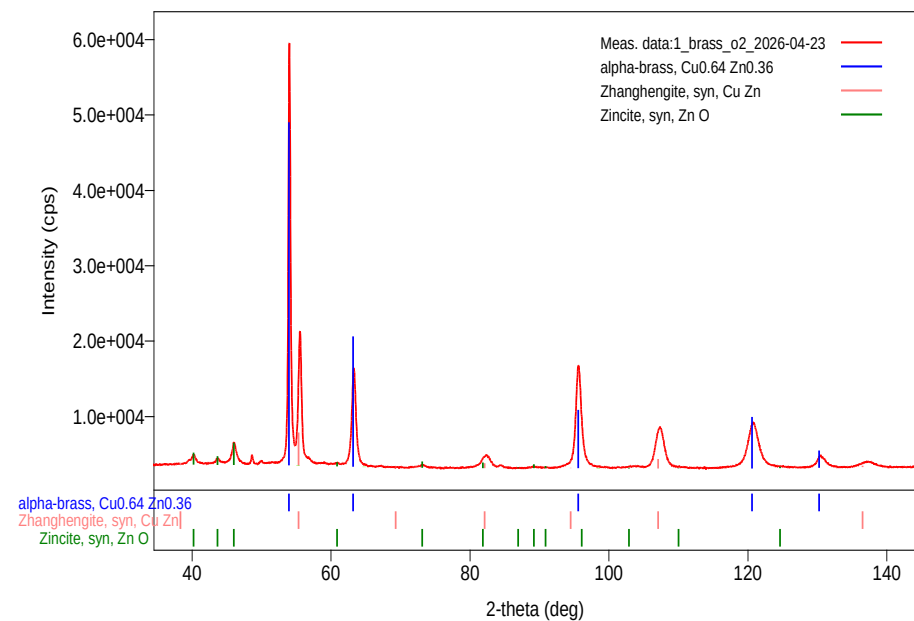


Рисунок 7 – Дифракционная картина образца №1 (Л63)

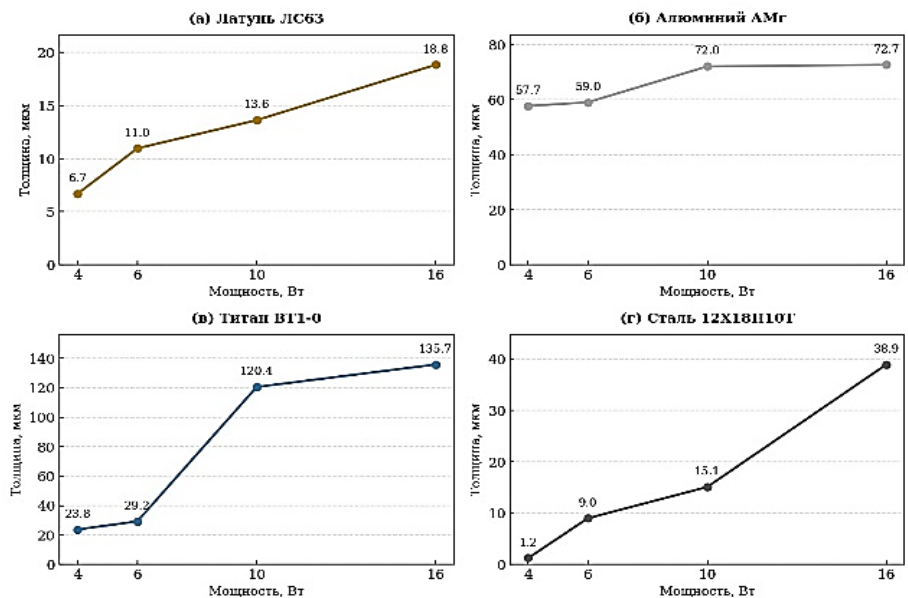


Рисунок 6 - Зависимость толщины пленочного комплекса от мощности лазерного воздействия

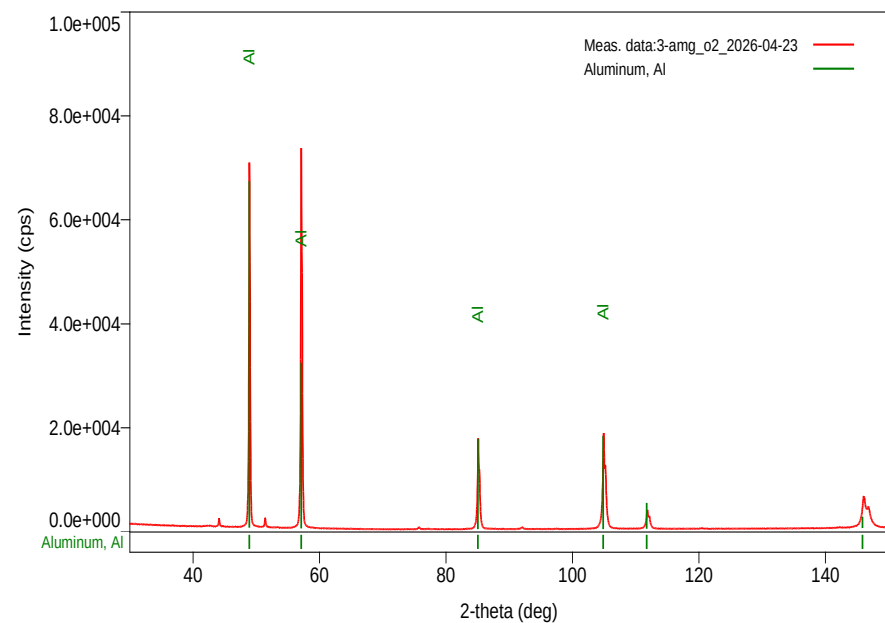


Рисунок 8 – Дифракционная картина образца №3 (АМг)

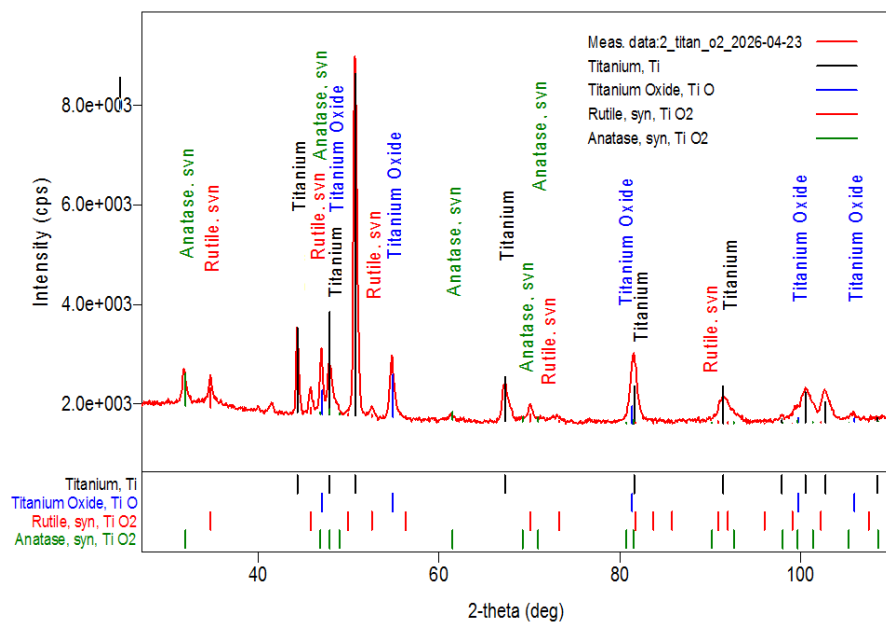


Рисунок 9 – Дифракционная картина образца №2 (BT-1)

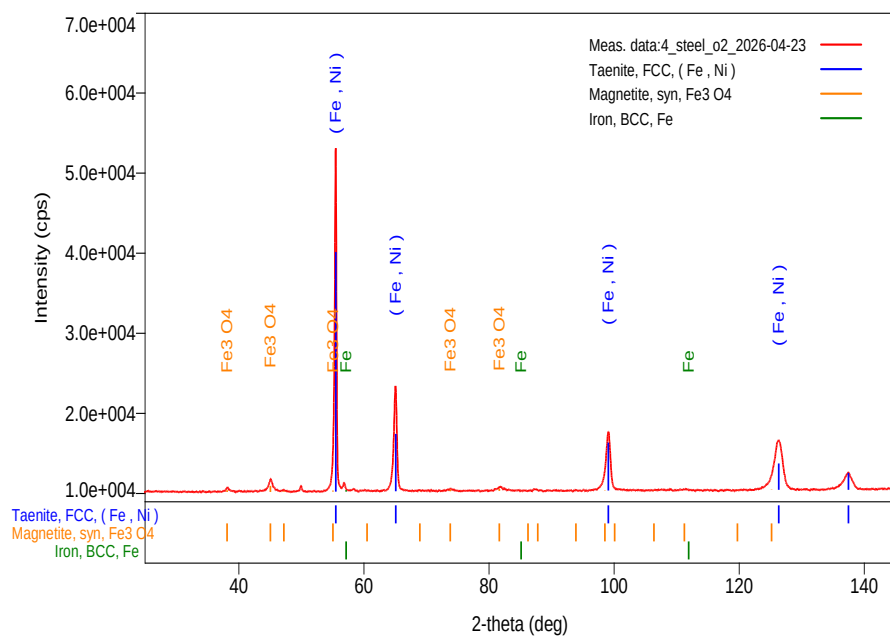


Рисунок 10 – Дифракционная картина образца №4 (12X18H10T)

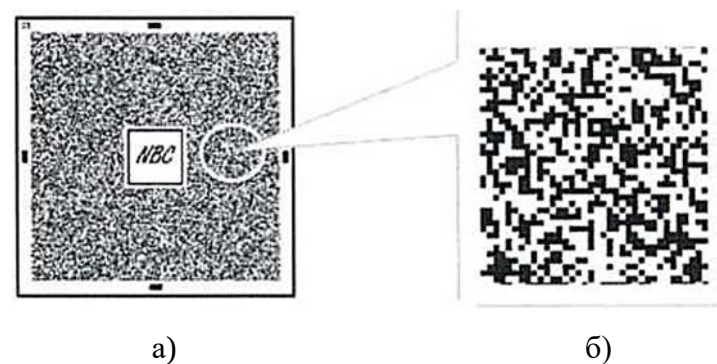


Рисунок 12 - Внешний вид ультраплотной записи НБК
а) НБК без увеличения; б) часть НБК с увеличением x10

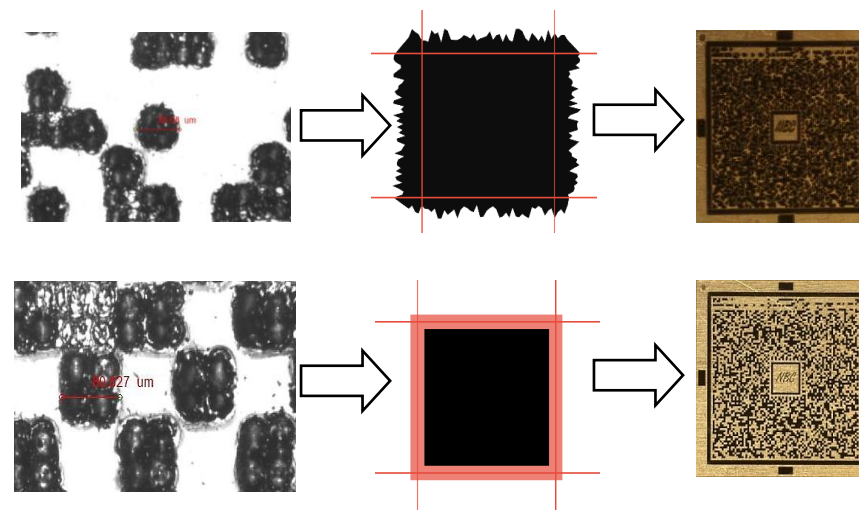


Рисунок 13 - Влияние нарушения микроструктуры модулей на формирование НБК