


На правах рукописи

Кончус Дарина Александровна



**УСТАНОВЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ
СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ
ПРИ ИХ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКЕ**

*Специальность 05.16.09 – Материаловедение
(машиностроение)*

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

Санкт-Петербург – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор

Пряхин Евгений Иванович

Официальные оппоненты:

Жукова Любовь Тимофеевна

доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», директор института прикладного искусства, заведующая кафедрой технологии художественной обработки материалов и ювелирных изделий;

Горный Сергей Георгиевич

кандидат технических наук, общество с ограниченной ответственностью «Лазерный Центр», генеральный директор;

Ведущая организация – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород.

Защита диссертации состоится 23 декабря 2021 г. в 12:00 на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.07 Горного университета по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия В.О., д.2, ауд. № 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 23 октября 2021 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



Звонарев
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Лазерная маркировка имеет специфические особенности формирования изображения на поверхности различных материалов. Качество маркировки во многом зависит от маркируемых материалов, состояния поверхности, на которую наносятся маркеры, ее долговечность от условий эксплуатации деталей. Все это требует комплексных исследований, разработки нормативной документации для получения качественной и долговечной маркировки. В последнее время значительно возросла востребованность в лазерной маркировке. Поэтому является актуальным изучение влияния режимов лазерной маркировки на поверхность металлических изделий с установлением закономерностей изменений физико-химических свойств маркированной поверхности, влияющих на ее качество, а соответственно, и на считывание закодированной информации. Однако до настоящего времени таких всесторонних исследований не проводилось.

Степень разработанности темы исследования. Проблемами лазерного излучения и лазерной маркировки занимались многие ученые, среди которых В.И. Артюшина, А.М. Валиулин, В.П. Вейко, Р.Ф. Войтович, Э.И. Головкин, С.Г. Горный, А.Г. Григорьянц, У. Дьюли, И.Р. Емельченков, Н.В. Карлов, Н.А. Кириченко, С.Ю. Клочков, Б.С. Лукьянчук, С.М. Метев, С.П. Мурзин, Д.М. Прибытков, А.А. Соколов, И.Н. Францевич, Д.А. Ховив.

Работы этих авторов посвящены исследованиям лазерного воздействия в нанопленках различных веществ, созданию микролинз для улучшения оптики, разработке новых и улучшению существующих технических параметров лазерных комплексов, разработке специального программного обеспечения для формирования цветного изображения на поверхности изделий.

Однако недостаточно внимания уделено изучению факторов, влияющих на шероховатость маркируемой поверхности, технологических режимов самой маркировки, функционирования в коррозионной среде, температуры эксплуатации маркируемых деталей, срока службы нанесенного изображения в виде QR-кода и его считываемость. Решение этих вопросов требует проведения дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Цель работы. Выявление закономерностей изменения физико-химических свойств поверхности из легированной хромоникелевой стали, алюминиевых и титановых сплавов, а также латуни после лазерного воздействия для научно обоснованного технологического решения по нанесению маркировки в виде QR-кода, внедрение которого вносит значительный вклад в развитие отрасли машиностроения страны.

Идея работы заключается в формировании посредством лазерного воздействия на поверхности маркируемой детали заданного сочетания плотности и конфигурации кратеров пятна лазерного луча необходимого размера, обеспечивающих требуемую контрастность изображения, формируемого маркировкой в отраженном свете за счет детерминированного поглощения части лучей последнего.

Задачи исследований:

Для достижения цели исследований были поставлены следующие задачи:

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных исследований по теме диссертационного исследования.

2. Теоретические исследования протекания физико-химических процессов на поверхности металлических изделий в результате лазерного воздействия для получения долговечной маркировки.

3. Провести экспериментальные исследования по нанесению маркировки на поверхности различных материалов при лазерном воздействии.

4. Оценить характер изменения физико-химических свойств поверхности, в зависимости от значений параметров лазерной маркировки; получить профилограммы и снимки микроструктур промаркированной поверхности. Проанализировать микрогеометрию поверхности стали после маркировки, определить контрастность и шероховатость кода и выявить зависимость между этими показателями.

5. Провести испытания образцов с маркировкой на стойкость к межкристаллитной коррозии, воздействию растворов ки-

слот, солей и щелочей, кипящей водопроводной воды, сильнодействующих бытовых моющих и дезинфицирующих средств различной активной среды, а также оценить температурное воздействие на промаркированную поверхность.

6. Разработать рекомендации по нанесению долговечной маркировки на поверхность изделий из легированной хромоникелевой стали.

Научная новизна работы:

1. Установлена зависимость контрастности маркировки от величины мощности, скорости лазерного излучения, длительности импульса и линиатуры.

2. Выявлена логарифмическая зависимость между контрастностью и величиной показателя перепада шероховатости поверхности нанесенной маркировки, при этом контрастность маркировки повышается с увеличением величины показателя перепада шероховатости.

3. Установлено, что значение контрастности для стали 08X18H10 остается стабильным вплоть до 300 °С, сплава АМг2М вплоть до 400 °С, сплава Вт1-0 – постепенно снижаются вплоть до 500 °С, латуни Л63 остается стабильным вплоть до 600 °С.

Практическая и теоретическая значимость работы:

1. Установлена функциональная взаимосвязь между параметрами лазера и качеством маркировки: глубина оплавления и длительность воздействия приводит к изменению структуры оплавленной зоны, значений микротвердости и перепада шероховатости.

Для марки стали 08X18H10 значимыми параметрами маркировки являются скорость нанесения подложки, а также мощность лазерного излучения; сплава АМг2М – длительность и частота следования импульса лазерного излучения; сплава Вт1-0 – линиатура и скорость нанесения кода, а также частота импульсного воздействия; латуни Л63 – мощность лазерного излучения при нанесении кода.

2. Логарифмическая зависимость между контрастностью и показателем перепада шероховатости поверхности нанесенной маркировки позволяет использовать профилометр для оценки контрастности нанесенного изображения.

3. Проверено влияние лазерной маркировки на коррозионную стойкость в растворах кислых, щелочных и нейтральных сред. Выявлено, что маркированные лазером изделия из коррозионно-стойкой стали не следует подвергать очистке при помощи щелочных моющих средств. При этом очагами коррозии стали области маркировки, в которых начиналось лазерное воздействие, приводящее к локальному изменению структуры. Перед внедрением изделий с лазерной маркировкой в промышленность требуется тщательный анализ среды работы данного изделия. По результатам проделанной работы можно судить о нежелательных режимах эксплуатации изделий с лазерной маркировкой (агрессивные среды в присутствии ионов хлора, кипящая вода). В дальнейшем рекомендуется уделить большее внимание оптимизации режимов маркировки, с возможным снижением начальной пиковой мощности лазера.

4. Материалы диссертационной работы приняты к внедрению в ООО «Лазерный центр», г. Санкт-Петербург. Рекомендации по применению оптимальных параметров режимов лазерной маркировки различных металлических материалов будут использоваться при маркировке и гравировке готовых изделий при декоративной лазерной обработке.

Методология и методы исследования. Проведение исследований осуществлялось в соответствии с системным подходом, математическим и имитационным моделированием процессов лазерного термического воздействия. При решении поставленных задач в работе использован комплексный подход, включающий теоретические и экспериментальные исследования, обработку и анализ результатов с использованием аналитического синтеза, метода математического анализа, а также экспериментальные исследования методом определения контрастности QR-кода и шероховатости поверхности, оценки коррозионной стойкости и показателей коррозии, определения микротвердости.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Установлено, что рациональным режимом лазерной маркировки поверхности для коррозионно-стойкой стали 08X18H10 является мощность излучения маркера «МиниМаркер2 - М20» равная 40 %, частота импульса – 100 кГц, длительность импульса –

200 нс. При этом частота и длительность импульса оказывают наибольшее воздействие на контрастность полученного изображения и его считываемость.

2. Выявлено, что поверхность, подвергшаяся лазерной маркировке в виде QR-кода, имеет бороздчатую структуру информационного блока с глубиной оплавления 60 мкм, высота наростов по краям такой борозды варьируется от 0,5 мкм до 16 мкм. В пределах показателя перепада шероховатости от 3,14 мкм до 8,00 мкм поверхность обладает высоким показателем контрастности, равным 81-83 % и приводящим к уверенному и быстрому считыванию QR-кода.

Степень достоверности результатов исследования обеспечена использованием стандартных методов математического и имитационного моделирования, методов классической механики, статистики для анализа экспериментальных данных, достаточной сходимостью теоретических и экспериментальных результатов.

Апробация результатов работы. Основные положения и результаты работы докладывались и получили положительную оценку на следующих семинарах и конференциях: Международная научно-практическая конференция «Современные тенденции развития естествознания и технических наук» (г. Белгород, 2018 г.); Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDMI-2018, 2019, 2020, 2021» (г. Санкт-Петербург, 2018-2021 гг.); XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования» (г. Санкт-Петербург, 2020 г.); Международный симпозиум «Нанофизика и наноматериалы» (г. Санкт-Петербург, 2019, 2020 гг.).

Личный вклад автора заключается в постановке цели, формулировке задач, разработке методик диссертационного исследования; анализе зарубежной и отечественной научной литературы по теме исследования, проведении экспериментальных исследований нанесения лазерной маркировки на изучаемую поверхность, выявления зависимости качества маркировки и считывания QR-кода от технологических параметров лазерного маркера,

выявлении зависимости среды на коррозионную стойкость маркированных образцов.

Результаты диссертации в достаточной степени освещены в 16 печатных работах, в том числе в 3 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 3 статьях – в изданиях, входящих в международную базу данных и систему цитирования SCOPUS. Получено 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из оглавления, введения, шести глав с выводами по каждой из них, заключения, списка литературы, включающего 115 наименований, и 3 приложений. Материалы работы изложены на 132 страницах машинописного текста, содержат 124 рисунка и 21 таблицу.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении представлены актуальность и степень разработанности темы исследования, цель, задачи, идея и научная новизна исследования, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробация результатов работы, личный вклад соискателя и данные о публикациях.

В первой главе представлены применяемые способы маркировки изделий, процессы, происходящие на металлической поверхности при лазерном воздействии, исследование отпечатка лазерного импульса в зависимости от основных параметров лазерной установки, зависимость оптических характеристик изображений при лазерной маркировке от состояния поверхности детали (шероховатость, цвет поверхности), а также основные аспекты коррозии металлов. В целях уменьшения коэффициента отражения, увеличения коэффициента поглощения и улучшения считываемости кода под непосредственно маркировку наносится «подложка». При нанесении подложки происходит нагрев на меньшие температуры, глубина оплавления и длительность воздействия меньше. Лазерное воздействие при маркировке металлических изделий за-

ключается в изменении структуры металла в оплавленной зоне, что приводит к росту значений микротвердости и шероховатости. Влияние лазерной маркировки на стойкость к межкристаллитной коррозии (МКК) и образованию химической и электрохимической коррозии требует отдельного изучения. Работ, посвященных данной теме, найдено не было. Исходя из результатов проведенного анализа, в конце первой главы были сформулированы цель и задачи научного исследования.

Во второй главе описывается применяемое современное оборудование, материалы и методики исследования. Нанесение маркировки в виде QR-кодов на металлические образцы осуществлялось лазерным маркером МиниМАРКЕР 2-М20 с программным обеспечением «Маркер» пакета «SinMark». Измерение микротвердости проводилось на ПМТ-3М, металлографическое исследование осуществлялось с помощью микроскопов фирм Leica модели DM ILM и Zeiss Observer с программным обеспечением Leica Application Suite Version 3.7.0. и AXIO Vision. В работе использовался портативный профилометр Miyutoyo SJ-210. Рентгеноструктурный анализ образцов из стали 08X18H10 после лазерной маркировки проводился на рентгеновском дифрактометре XRD-7000 фирмы «Shimadzu». Растровая электронная микроскопия исследуемых образцов проводилась на 2х микроскопах – QUANTA 200 3D и NOWA NanoSEM 450 фирмы FEI. Для получения показателя контрастности использовалась пробная версия программы Photoshop CC официального поставщика программы Photoshop. Оценка коррозионной стойкости маркированной поверхности к МКК проводилась по методу АМУ. Качество поверхности после воздействия промышленных моющих средств в диапазоне pH 0-12 оценивалось основными показателями питтинг-коррозии по методу двойной фокусировки. Также оценивалось температурное воздействие на нанесенную маркировку.

В третьей главе изложены результаты проведенных исследований по планированию эксперимента для оценки значимости параметров маркировки нанесения кодировки на различные конструкционные материалы. За функцию отклика был выбран показатель контрастности изображения.

Планирование для стали марки 08X18H10 было выполнено с помощью дробного факторного эксперимента с дублированием в центре плана вида 2^{7-3} . Функция отклика имеет вид: $Y=0,661+0,065x_1+0,026x_2-0,045x_4-0,015x_5+0,024x_6+0,091x_7$. Наибольшее влияние оказывает значение длительности импульса и частоты нанесения маркировки.

Для алюминиевого сплава марки АМг2М было выполнено с помощью дробного факторного эксперимента с дублированием в центре плана вида 2^{8-2} . Функция отклика имеет вид: $Y=0,739+0,029x_1-0,088x_2+0,083x_3+0,116x_5+0,029x_6+0,054x_8$. Наибольшее влияние на контраст оказывает взаимосвязь между частотой нанесения линий как на подложку, так и на код, и длительностью импульса нанесения.

Планирование для титанового сплава марки Вt1-0 было выполнено с помощью дробного факторного эксперимента с дублированием в центре плана вида 2^{7-2} . Функция отклика имеет вид: $Y=0,8715-0,0098x_1-0,0386x_4+0,0362x_7$. На контрастность маркировки наибольшим образом влияет, значение скорости нанесения кода и линиатуры.

Планирование для сплава латуни марки Л63 было выполнено с помощью полного факторного эксперимента. Функция отклика имеет вид: $Y=0,8649+0,0331x_2+0,0320x_5$. Наибольшее влияние на контрастность оказывает мощность и длительность импульса.

В четвертой главе проведены теоретические и экспериментальные исследования по установлению взаимосвязи параметров лазерной маркировки с оптическими характеристиками стали и определение влияния качества поверхности на оптические свойства поверхности.

В качестве изображения при лазерной маркировке в работе использовался QR-код, который наносился на пластины из стали 08X18H10. На рисунке 1 показан пример полученной профилограммы исследуемого образца № 2. В результате исследования снимков микроструктур QR-кода было выявлено, что поверхность представляет собой борозды, которые появляются в результате прохождения лазерного луча по поверхности стали. Ширина борозды составляет порядка 30 мкм, что соответствует диаметру ла-

зерного пятна. Если образуется расстояние между бороздами, то оно достигает значения 10 мкм, и варьируется (рисунок 2) в зависимости от параметров, особенно от линиатуры.

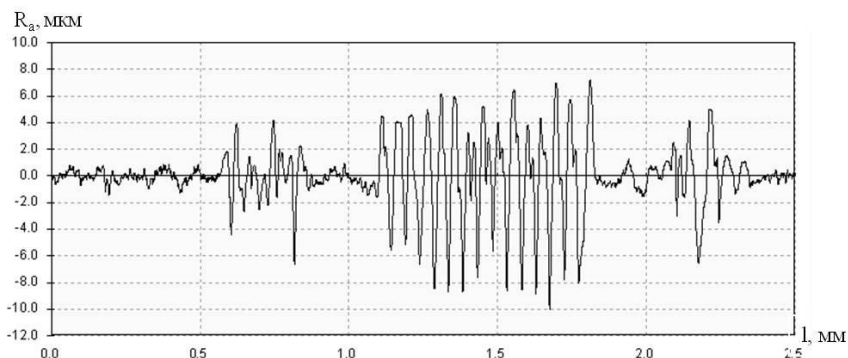
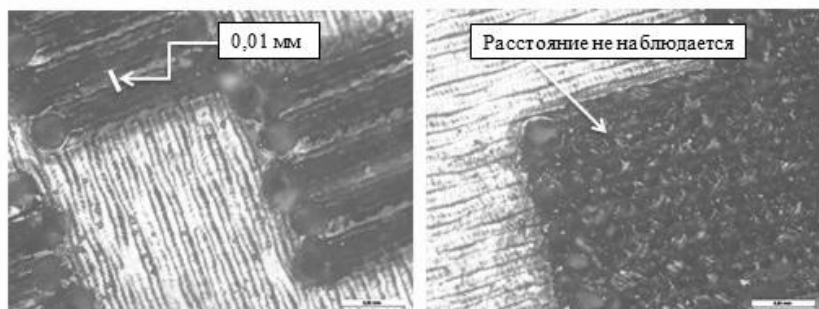


Рисунок 1 – Профилограмма образца № 2



а

б

Рисунок 2 – Различие в расстоянии между бороздами для образцов, $\times 20$: № 9 (а) и № 2 (б)

Наличие расстояния между бороздами отрицательно сказывается на контрастности кода, так как данные промежутки между проходами лазера обладают меньшей поглощательной и большей отражательной способностью, чем борозды. Повышение линиатуры способствует повышению контрастности. Увеличение интенсивности лазерного излучения, наряду с оплавлением поверхности, приводит к формированию системы концентрических колец в начале каждого прохода на поверхности стали. Интенсивность мощности последующих импульсов влияет на рельеф поверхности кода.

При росте интенсивности происходит увеличение степени оплавления поверхности с одновременным повышением высоты волнового рельефа. Анализ профилограмм показал, что расположение пиков шероховатости соответствует наростам в области воздействия потока излучения, которые заметны на снимках микроструктуры, следовательно, использование профилометра пригодно для изучения сложного рельефа поверхности после лазерного облучения. Глубина оплавления, равная 60 мкм, была определена с помощью поперечного микрошлифа (рисунок 3).

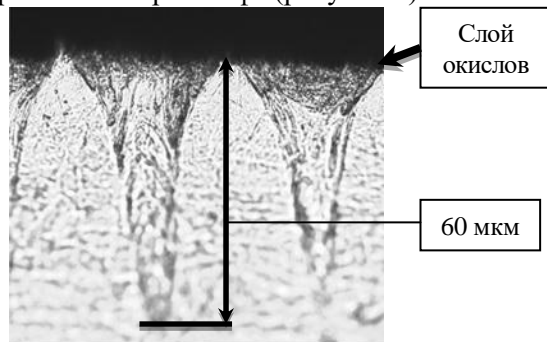


Рисунок 3 – Поперечный микрошлиф маркированной стали, $\times 50$

В нижней части оплавления наблюдается зона столбчатых кристаллов, выше – мелкозернистая зона. Рентгеноструктурный анализ показал слой, представляющий интерес для данной работы, – слой окислов железа и хрома. В зависимости от толщины слоя изменяется цветовой тон поверхности образца.

При определении показателя контрастности K была определена разница в характеристиках цвета различных участков изображения – подложки (белого матового поля) и совокупности информационных блоков (темные поля). Показатель перепада шероховатости Δ необходим для оценки разницы между шероховатостью изображения (информационного блока) и шероховатостью фона (подложки). Показатели K и Δ образцов могут быть использованы для сравнения их между собой и определения вклада шероховатости в контрастность и, следовательно, в считываемость кода.

Полученные в ходе исследования показатели контрастности K и показатели перепада шероховатости между информационным блоком и подложкой Δ были сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Показатели K и Δ кода

№ образца	Контрастность	Шероховатость
	Показатель K , %	Показатель Δ , мкм
3	32	-0,11
16	52	0,75
14	64	1,42
9	68	1,66
2	71	2,30
11	75	2,46
6	81	3,14
15	82	4,28
4	83	8,00

В таблице сделана сортировка значений контрастности и перепада шероховатости от минимального значения к максимальному. С увеличением величины шероховатости поверхности наблюдается рост поглотительной способности твердых тел.

На контрастность и считываемость кода оказывает действие цвет поверхности. Эффект окрашивания вызван образованием оксидных диэлектрических пленок. Однако шероховатость поверхности вносит вклад в создание контрастности. Поэтому необходим также анализ влияния дифракционных эффектов на цвет, а значит и на контрастность кода.

В пятой главе проведены теоретические и экспериментальные исследования по изучению коррозионных свойств металлических сплавов, обработанных лазерным маркером. Было проведено испытание на стойкость образца с лазерной маркировкой к межкристаллитной коррозии (МКК). Сводные результаты испытаний на устойчивость маркировки к воздействию растворов щелочей, кислот и солевому раствору представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Сводные результаты испытаний образцов в растворах кислот, щелочей и соляном растворе

№	Среда испытания (водные растворы)	Время испытания, ч.	Результат	Примечание
1	9%-ный р-р CH ₃ COOH	100	Нет воздействия	Считываемость сохранилась
2	10%-ный р-р NaCl		Есть воздействие	Коррозия по границам кода. Считывания нет.
3	10%-ный р-р NaOH		Нет воздействия	Считываемость сохранилась
4	10%-ный р-р H ₂ SO ₄		Есть воздействие	Растворение Me. Считывания нет
5	10%-ный р-р HNO ₃		Есть воздействие	Код менее яркий и контрастный. Считываемость сохранилась
6	10%-ный р-р HCl		Есть воздействие	Растворение Me. Считывания нет

Также образец был помещен в кипящую водопроводную воду при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в течение 3 часов. При наличии в одной среде ионов-активаторов (Cl^- , SO_4^{2-}) происходит нарушение сплошности пассивирующей пленки оксида и наблюдается частичное растворение металла на отдельных участках.

Проводилась оценка стойкости кода в 7 различных бытовых и промышленных чистящих и моющих средствах с различными активными средами с pH от 0 до 12. Длительность испытаний выбиралась из расчета частоты использования таких средств в быту. Время испытания 168 ч. Примеры коррозии на образцах представлены на рисунке 4.

Считываемость сохранилась у всех образцов, однако некоторые образцы считывались со значительной задержкой, поскольку появилась питтинг-коррозия (из-за наличия щелочной среды). Для определения степени поражения требуется определить поперечник

питтинга (его диаметр) (представлено на рисунке 5). Цена деления микрометра 0,025 мкм.



Рисунок 4 – Образцы после выдержки в «Sanfor белизна», для наглядности питтинги выделены кружками (а) и «Sanfor universal» (б)

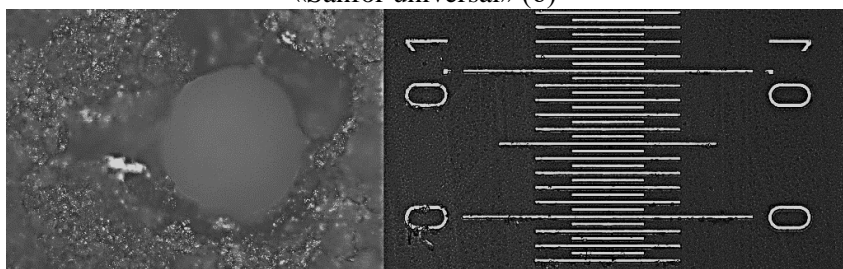


Рисунок 5 – Питтинг и «объект-микрометр», увеличение $\times 20$

В среднем диаметры питтингов данного образца составляют 0,5 мкм, площадь будет равна $0,785 \text{ мкм}^2$ ($0,8 \times 10^{-6} \text{ мм}^2$). Таких поражений на поверхности кода 8 штук. Площадь поверхности, занимаемая QR-кодом, подвергшаяся коррозии, составляет 1024 мм^2 . Степень поражения составила $6,25 \times 10^{-7}\%$. Глубина поражений определялась методом двойной фокусировки. Глубина составила 850 мкм, при толщине пластины в 1500 мкм.

Сталь 08X18H10, обработанная системой лазерной маркировки, обладает повышенной чувствительностью к щелочным растворам с высокими значениями водородного показателя. Данные средства имеют в своем составе ионы Cl которые также имеют пагубное влияние на сплошность пассивных пленок. Рост питтин-

гов начинался из мест, где наблюдалось лазерное воздействие наибольшей мощности и температуры (стартовой).

В шестой главе было оценено влияние термического воздействия на маркировку образцов из различных конструкционных сплавов. Результаты контрастности до термического воздействия представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Значения контрастности элементов кода в исходном состоянии

Сплав	Метод маркировки	RGB фона	RGB кода	Контрастность
ВТ1-0	С подложкой	190	2	0,99
	Без подложки	128	4	0,97
Л63	С подложкой	132	10	0,92
	Без подложки	90	15	0,83
08X18H10	С подложкой	130	22	0,83
	Без подложки	84	26	0,69
АМг2М	С подложкой	180	4	0,98
	Без подложки	80	4	0,95
На бумаге	–	200	19	0,91

Все образцы подвергались термическому воздействию при температуре от 100 °С до 600 °С с выдержкой в течение часа и последующим охлаждением на воздухе.

По результатам исследования можно сказать, что на титановом сплаве ВТ1-0 значение контрастности постепенно снижаются вплоть до 500 °С, при дальнейшем нагреве темные окислы с поверхности образца выцветают, а значение контрастности возрастает. На латуни Л63 было выявлено, что значение контрастности остается стабильным вплоть до 600 °С из-за устойчивости черных окислов к температурному воздействию. Значение контрастности для коррозионностойкой стали 08X18H10 остается стабильным вплоть до 300 °С. На поверхности АМг2М изображение остается контрастным вплоть до 400 °С.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой предлагается новое на-

учно-обоснованное технологическое решение актуальной научной задачи – реализация комплексного подхода к изучению лазерного воздействия на маркируемую поверхность металлических изделий по нанесению QR-кода.

По результатам выполнения диссертационной работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Анализ и обобщение результатов теоретических и экспериментальных данных по теме диссертационного исследования показал, что необходимо провести исследование факторов, влияющих на шероховатость маркируемой поверхности и технологические режимы самой маркировки. Оценить функционирование в коррозионной среде, температуру эксплуатации маркируемых деталей и считываемость нанесенного изображения в виде QR-кода.

2. На контрастность маркировки деталей из стали 08X18H10 влияют скорость нанесения подложки и мощность лазерного излучения. Для сплава марки АМг2М значимыми параметрами маркировки являются длительность и частота следования импульса лазерного излучения; контрастность QR-кода, нанесенного на сплав Вt1-0, зависит от линиатуры, скорости нанесения кода и частоты импульсного воздействия; мощность лазерного излучения при нанесении кода на латунь Л63 влияет на контрастность маркировки.

3. После маркировки поверхность стали приобретает борозчатую структуру; борозды информационного кода имеют ширину 30 мкм, глубину оплавления 60 мкм и расстояние между бороздами, которое изменяется в зависимости от линиатуры и плотности мощности лазерного излучения; высота наростов по краям борозды информационного блока варьируется от 0,5 мкм до 16 мкм вследствие протекания различных физических процессов.

4. Обнаружены следующие дефекты: образование системы концентрических колец после воздействия мощного первого импульса прохода, наличие рассеяния границ информационного блока у образцов с высокой и средней плотностью мощности и большим временем воздействия.

5. Определена логарифмическая зависимость изменения контрастности от величины шероховатости поверхности стали Ra вида $y = A \cdot \ln(Ra) + C$, что позволяет использовать профилограммы

маркированных поверхностей для оценки контрастности. При этом для стали 08X18H10 коэффициенты A и C равны соответственно 22,94 и 34,925. Однако шероховатость вносит меньший вклад в повышение контрастности, чем цветовой тон поверхности информационного блока и подложки.

6. Исследования показали, что лазерная маркировка не провоцирует склонность стали к межкристаллитной коррозии.

7. Стойкость лазерной маркировки к воздействию растворов кислотных, щелочных и нейтральных сред определяется как химическим составом реактива, так и химическим составом самой стали.

8. Разработаны алгоритм и база данных, позволяющие автоматически подбирать рациональный режим маркировки в зависимости от используемого материала при использовании запатентованной программы «Метацвет» (свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2018614253).

9. Результаты диссертационной работы будут использоваться при декорировании, гравировке и маркировке готовой продукции в ООО «Лазерный центр» (акт о внедрении от 10.06.2021 г.).

СПИСОК ОСНОВНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях из Перечня ВАК:

1. Кончус, Д.А. Влияние лазерной маркировки на свойства поверхности стали 08X18H10 / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, О.С. Чиркова // Научно-производственный журнал «Металлообработка». - 2018. - №4 (106). - С. 21-27.

2. Кончус, Д.А. Влияние лазерной маркировки на коррозионную стойкость нержавеющей стали / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, А.В. Михайлов, Е.И. Пряхин // Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки. - 2020. - Т. 26. - № 1. - С. 62–74.

3. Кончус, Д.А. Особенности лазерной маркировки металлических изделий / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, Е.И. Пряхин // ГБОУ ВО МО «Технологический университет». - 2020. - № 1(23) – С. 157-164.

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

4. Konchus, D.A. Assessment of laser marking contrast with profilometer / D.A. Konchus, A.V. Sivenkov, O.S. Chirkova, E.I. Pryakhin // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – 194. – 042022.

5. Konchus, D.A. The formation of contrasting nanofilms on a metal surface for bar coding / D.A. Konchus, A.V. Sivenkov // Key Engineering Materials. – 2020. – 854. – pp. 97-102.

6. Konchus, D.A. A surface structure formation of stainless steel using a laser / D.A. Konchus, A.V. Sivenkov // Materials Science Forum. – 2021. – 1022. – pp. 126-132.

Публикации в прочих изданиях:

7. Кончус, Д.А. Влияние лазерной маркировки на изменение структуры и свойств стали аустенитного класса / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, Е.И. Зверькова // Международная научно-практическая конференция «Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDMI-2017». - 2017. - С. 364-368

8. Кончус, Д.А. Оптимизация режимов лазерной маркировки изделий из алюминиевого сплава методом планирования эксперимента / Д.А. Кончус, Ю.С. Зуева // Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки: сборник научных статей. - 2017. - С. 73-77.

9. Кончус, Д.А. Оптимизация режимов лазерной маркировки изделий из коррозионностойкой стали методом планирования эксперимента / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, В.О. Никитина // Тенденции развития современного естествознания и технических наук: сборник научных трудов. - 2017. – С. 139-142.

10. Кончус, Д.А. Исследование свойств коррозионностойкой стали, обработанной системой лазерной маркировки «Мини-маркер2- М20А4» / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, А.В. Михайлов // Современные тенденции развития естествознания и технических наук: сборник научных трудов. - 2018. – С. 218-221.

11. Кончус, Д.А. Получение контрастной лазерной маркировки на изделиях из титанового сплава ВТ1-0 / Д.А. Кончус,

А.В. Сивенков, Е.А. Анхимова // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Сборник тезисов. Секция «Круглый стол молодых ученых». – 2018. – С. 18.

12. Кончус, Д.А. Лазерная маркировка QR-кодом изделий из алюминиевого сплава АМг2М / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, Ю.С. Зуева // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Сборник тезисов. Секция «Круглый стол молодых ученых». – 2018. – С. 77.

13. Кончус, Д.А. Разработка методики определения контрастности лазерного изображения на металлической поверхности / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, В.О. Никитина // Инновации и перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: IPDME-2018. Сборник тезисов. Секция «Круглый стол молодых ученых». – 2018. – С. 125.

14. Кончус, Д.А. Формирование контрастных нанопленок на поверхности металла для штрихкодирования / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков, И.Н. Фоменко // Нанозифика и наноматериалы. Сборник научных трудов. - 2019. – С. 122-127.

15. Кончус, Д.А. Коррозионная стойкость нержавеющей стали при лазерной маркировке нефтедобывающего и перерабатывающего оборудования. XVIII Всероссийская конференция-конкурс студентов и аспирантов «Актуальные проблемы недропользования», 15-17 апреля 2020 г.: тезисы докладов / [председатель редакционной коллегии: Т.А. Петрова]. - Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский горный университет, 2020. - С. 321

16. Кончус, Д.А. Оптимизация режимов лазерной маркировки изделий из алюминиевого сплава методом планирования эксперимента / Д.А. Кончус, А.В. Сивенков // Нанозифика и наноматериалы. Сборник научных трудов. – 2020. – С. 174-180.

Свидетельства:

17. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018614253. МЕТАЦВЕТ № 2018611432: заявл. 14.02.2018; опублик. 03.04.2018 / Д.А. Кончус, Е.В. Ларионова, Е.И. Пряхин; заявитель Горный университет. – 1 с.