



Конкурс для школьников «Гениальные мысли» Автореферат проекта призера II степени

Название работы – Применение нанотехнологий для создания изображений посредством структурного цвета.

Автор – Чудиновских Юлия Павловна (8 класс, МАОУ – Гимназия № 47, г. Екатеринбург).

Руководители – Чуваков Алексей Витальевич, учитель высшей квалификационной категории; Гимадеева Любовь Вячеславовна, м.н.с. Лаборатории наноразмерных сегнетоэлектрических материалов, УрФУ.

Основная идея работы, цели, задачи

На данном этапе развития науки возникает противоречие между существующим уровнем знаний и представлений о цвете и реальными физическими свойствами. Из этого вытекает проблема, которая заключается в том, что люди используют, в основном, один тип воссоздания цвета (с помощью пигментов) и слабо задействуют другой способ (создание цвета за счет изменения структуры поверхности материала).

Основная идея проекта – получить изображение с помощью структурного цвета на металле и доказать, что цвет можно получить не только за счет пигмента.

Цель проекта – найти и осуществить методики получения структурных изображений, применимых для изготовления уникальной сувенирной продукции.

В ходе работы над проектом была выдвинута гипотеза исследования – окрашивание ряда поверхностей определяется их сложным строением и микро- и наноразмерными особенностями рельефа.

Объект исследования – структурный цвет.

Предмет – способы создания цвета посредством изменения структуры поверхности.

Для осуществления данной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) изучить особенности структурного цвета;
- 2) узнать, где и как он проявляется в природе;
- 3) исследовать строение чешуек на крыльях бабочек и стрекоз;
- 4) провести сравнительный анализ существующих методов создания изображения с помощью пигментов и структурного цвета;
- 5) создать цветное изображение с помощью изменения структуры поверхности материала;
- 6) определить возможности использования структурного цвета в промышленности и искусстве.

Основные результаты

Описание основных этапов исследования

Исследование включало в себя следующие этапы:

- 1) изучение научной литературы;
- 2) сравнение существующих способов изготовления цветного изображения на металлах;
- 3) исследование структурного цвета на примере крыльев насекомых;
- 4) создание изображения на металле с помощью лазерной абляции;
- 5) анализ полученных результатов.

На первом этапе исследование проводилось в рамках Уральской проектной смены в загородном центре «Таватуй» (август 2017 г.). Экспериментальная часть работы была выполнена в лаборатории сегнетоэлектриков отдела оптоэлектроники и полупроводниковой техники Института естественных наук и математики Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина на оборудовании Уральского Центра Коллективного Пользования «Современные нанотехнологии».

Сравнительный анализ методов создания структурных изображений

В ходе исследования была составлена таблица сравнения разных способов изготовления цветного изображения на металлах: металлофото, металлографики, шелкографии, гравертон, УФ-печати, основанных на использовании пигментов и зондовой нанолитографии, лазерной абляции, создающих структурный цвет (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение методов нанесения изображений на металл

	Точность графики	Износостойкость	Экологичность	Легкость производства	Разнообразие цветов
Фотолитография	+	+	+	+/-	+
Зондовая литография	+	+	+	+	+
Лазерная абляция	+	+	+/-	+	+
Ионный пучок	+	+	+	+	+
Металлофото	+	+	-	-	-
Металлографика	+	+	-	+/-	+
Шелкография	-	-	+	+	+
Гравертон	+/-	-	+	+	-
УФ-печать	+	+	-	+/-	+

По результатам таблицы можно сделать вывод, что технологии изготовления цветных изображений без красящих веществ во многом лучше, чем методы, использующие красители. Зондовая нанолитография и лазерная абляция – экологичные способы изготовления ярких, долговечных изображений с точной графикой. Преимуществом также является простой процесс изготовления изделий и дешевизна используемых материалов.

Исследование крыльев насекомых

Цель – исследовать крылья бабочек и стрекоз на наличие определенных структур, обеспечивающих различный окрас.

Во время изучения крыльев насекомых было использовано оборудование: оптические микроскопы OlymPus BX-61 (Olympus corp.) и PrimoStar (Carl Zeiss), сканирующий электронный микроскоп Auriga Cross Beam (CarlZeiss).

Исследование при помощи оптической микроскопии чешуек крыльев бабочек *Papilio demodocus* (рис. 1А), *Graphium agamemnon* (рис.1Б) и *Cethosia biblis* (рис.1В) позволило визуализировать отдельные чешуйки разных цветов, а сканирующей электронной микроскопией – увидеть особенности строения с разрешением до нескольких нанометров.

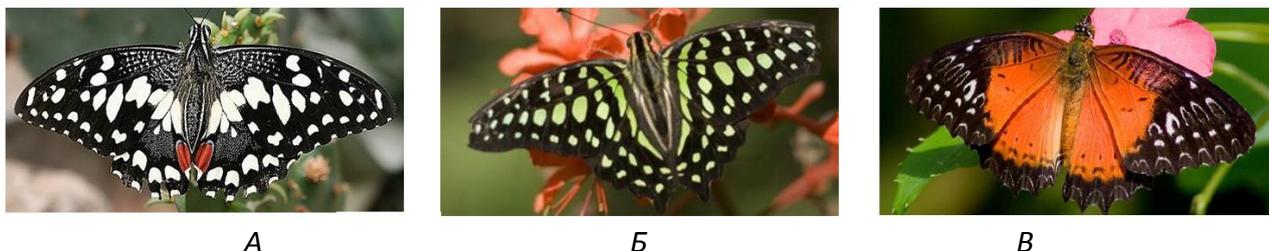


Рисунок 1. Исследуемые бабочки: А – *Papilio demodocus*¹; Б – *Graphium agamemnon*²; В - *Cethosia biblis*³.

Этап 1. Исследование при помощи оптической и сканирующей электронной микроскопии особенностей чешуек крыльев бабочки *Cethosia biblis*

По всей площади крыла чешуйки расположены близко относительно друг друга. Чешуйки разных цветов отличаются формой и размерами (рис. 2).

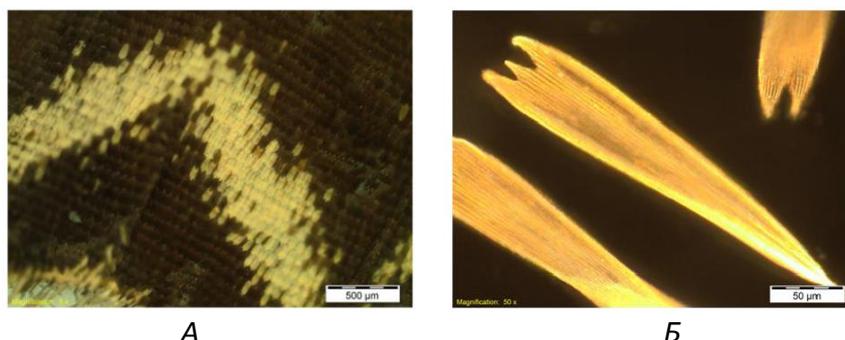


Рисунок 2. Изображения, сделанные на оптическом микроскопе: А – Чешуйки бабочки *Cethosia biblis*; Б – Чешуйки бабочки *Graphium agamemnon*.

На примере бабочки *Cethosia biblis* показано сложное трехмерное разветвленное строение чешуек крыльев. Можно выделить несколько основных элементов: «балки» проходят через всю длину чешуйки и соединяются перпендикулярными к ним «перемычками» (рис.3). У темных цветов наблюдается пустое пространство между «балками» и «перемычками». Для светлых структур характерно наличие пленки, что, вероятно, способствует отражению большей части падающего света. Дополнительное нано-и микроструктурирование боковых и фронтальных поверхностей «балок» и «перемычек» определяет конкретный оттенок чешуйки.

¹ *Papilio demodocus* [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.treknature.com/gallery/Europe/photo218350.htm> Дата обращения 11.11.2017

² Графиум (*Graphium agamemnon*) [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://babochkinedorogo.ru/product/grafium-graphium-agamemnon/> Дата обращения: 11.11.2017

³ *Cethosia biblis* [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://photographies.narod.ru/sections/insects/005.html> Дата обращения: 11.11.2017

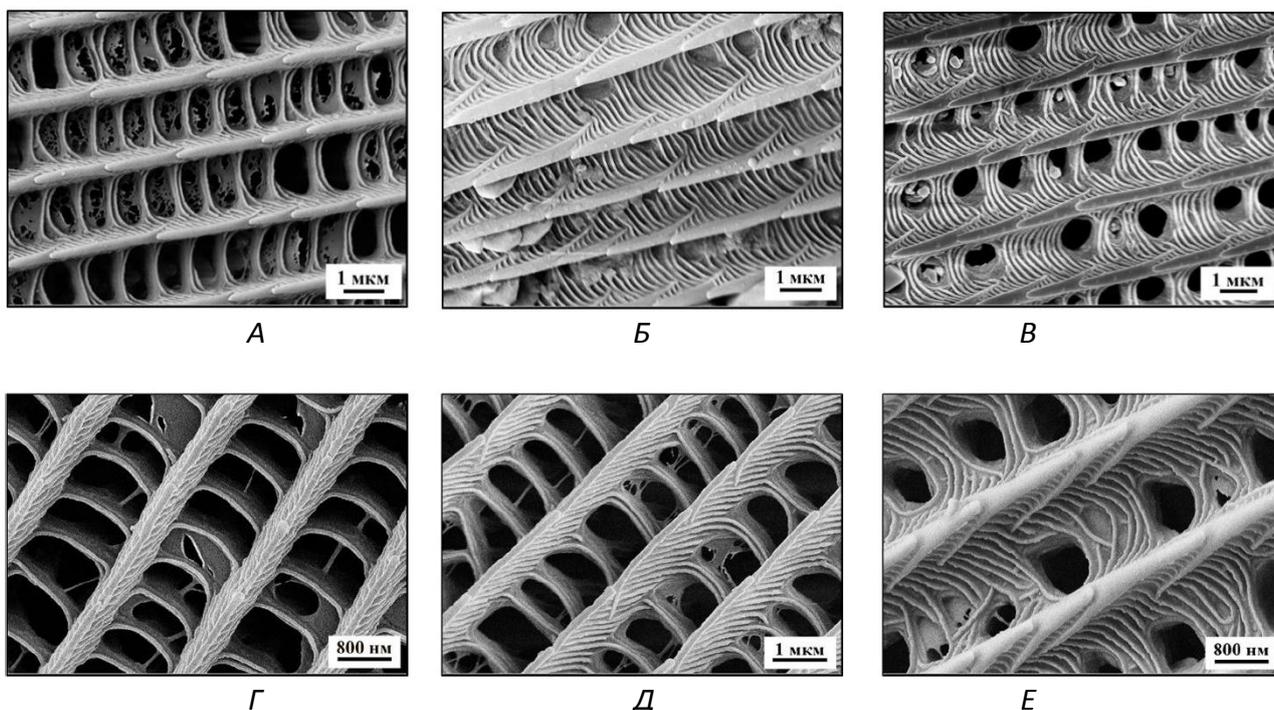


Рисунок 3. Чешуйки крыльев бабочки *Cethosia biblis*: А – коричневый цвет; Б – белый цвет; В – черный цвет; Г – серый цвет; Д – красный цвет; Е – оранжевый цвет (изображения автора)

Были рассчитаны характерные размеры структур: периоды (d) балок, перемычек, выпуклостей и ребер (табл. 2).

Таблица 2. Характерные периоды структур чешуек бабочки *Cethosia biblis*

	Коричневый	Белый	Черный	Оранжевый	Красный	Серый
d балок, мкм	1,71	1,38	1,89	1,69	1,98	1,7
d перемычек, мкм	0,79		1,24	0,68	1,43	0,81
d ребер, мкм	0,18	0,16	0,18		0,16	0,11
d выпуклостей, мкм		0,35	0,49			

В процессе исследования были рассчитаны средние значения периодов и длин структуры всех изучаемых насекомых (табл.3).

Таблица 3. Усредненные значения характеристик особенностей структур

	Среднее значение, мкм
d балок	1,73
d перемычек	0,79
d ребер	0,15
d выпуклостей	0,42
d бороздок на волосках	1,15
L волосков	53,6
L основания волосков	5,53
L бороздок	138,8
V прожилок	20,28

В ходе исследования крыльев бабочек и стрекоз были сделаны следующие выводы:

- 1) Структуры чешуек крыльев бабочек имеют сложное, разветвленное строение, состоящее из «балок», проходящих через всю длину чешуйки и соединенных между собой «перемычками»;
- 2) Показано, что у разных видов бабочек для схожих цветов морфология взаимоподобна:
 - а) У темных цветов наблюдается пустое пространство между «балками» и «перемычками»;
 - б) Для светлых цветов характерно наличие пленочных структур, что, вероятно, способствует отражению большей части падающего света;
 - в) Дополнительное нано-и микроструктурирование боковых и фронтальных поверхностей «балок» и «перемычек» определяет конкретный оттенок чешуйки.
- 3) Крыло стрекозы разделено прожилками на небольшие многоугольники, между которыми есть тонкая хитиновая структура, покрытая микроворсинками. Переливы цветов достигаются за счет интерференции света.

Создание изображения с помощью лазерной абляции

Цель – нанести на металл цветные изображения и надписи с помощью метода лазерной абляции.

Для нанесения изображений методом лазерной абляции использовался волоконный иттербиевый лазер Fmark-20 RL с характеристиками: длительность импульса 100 нс, мощность 20 Вт, длина волны $\lambda=1,07$ мкм, частота излучения $\omega=20\div 100$ кГц. Работа проводилась на шпателях из медицинской стали.

Этап 1. Разработка графической версии изображений

На данном этапе были разработаны эскизы изображений четырех типов: картина, простой и сложный логотипы (состоящие из одного или нескольких цветов), надпись. Предполагаемыми изображениями и надписями стали: стилизованная картина Ван Гога «Звездная ночь» (рис. 4А), логотип «StructuralColor» (рис. 4Б), буква «У» (рис. 4В) – логотип Уральского федерального университета (УрФУ), логотип Чемпионата мира по футболу (рис. 4Г).

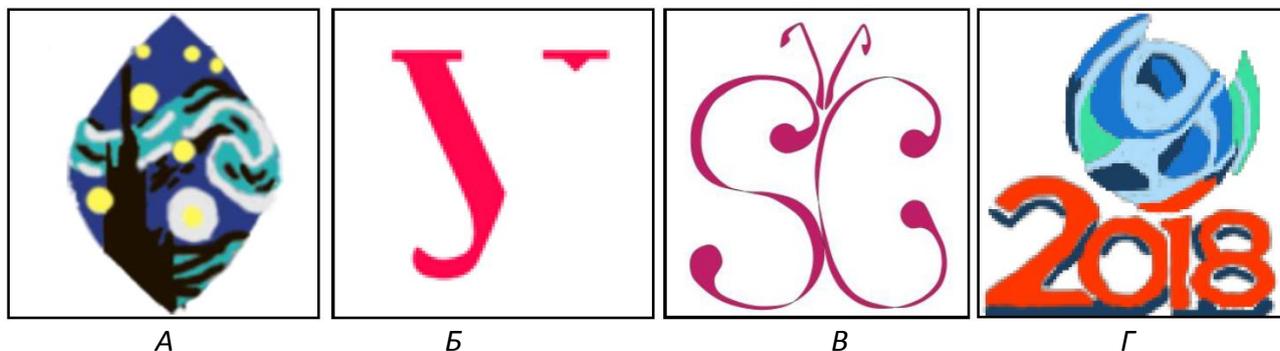


Рисунок 4. Эскизы изображений: А – стилизованная картина Ван Гога «Звездная ночь»; Б – логотип УрФУ; В – логотип «StructuralColor»; Г – логотип для Чемпионата мира по футболу (изображения автора)

Все эскизы были разобраны по цветам на отдельные файлы (каждый цвет – отдельный файл), имели квадратную форму, ширину и высоту 100 пикселей, разрешение 254 пикселя на дюйм. Формат изображений – «.jpg». Цвета в одном логотипе не должны накладываться друг на друга.

Этап 2. Подбор параметров для разных цветов

Для того чтобы нанести изображения на металл, нужно подобрать параметры лазера для создания определенного цвета. Цвет зависит от таких параметров:

- 1) скорость V , мм/с;
- 2) мощность P , Вт;
- 3) частота F , кГц;
- 4) количество проходов p .

Также важно учитывать фокусное расстояние до образца. При неправильном фокусе цвета могут получаться блеклыми или сожженными, абсолютно-черными. Параметры подбираются с помощью нанесения на стальные шпатели квадратов размером 5×5 мм.



Рисунок 5. Шпатели с квадратами разных цветов (изображения автора)

Шпатели могут быть представлены на очной защите как результат проведенного исследования.

В процессе работы была создана таблица параметров лазера подходящих цветов (табл. 4). Скорость варьируется от 50 до 250 мм/с, мощность – от 50 до 100%, количество проходов – от 1 до 6 раз. Частота оставалась неизменной – 21 кГц.

Таблица 4. Параметры оптоволоконного лазера для создания выбранных цветов

Цвет	Скорость, мм/с	Мощность, %	Частота, кГц	Проходы
Розовый	100	50	21	5
Зеленый	50	50	21	5
Серый	50	50	21	4
Желтый	250	50	21	3
Синий	70	50	21	5
Голубой	150	75	21	4
Зелено-черный	80	50	21	5
Черный	80	100	21	5
Розовый	80	60	21	6
Темно-зеленый	80	80	21	4
Белый	150	50	21	1

Этап 3. Нанесение цветных изображений на шпатель

Заключительным этапом стало нанесение изображений на шпатель из медицинской стали. Каждый цвет наносился последовательно. В процессе нанесения цвета подложка должна оставаться неподвижной для совмещения изображений-шаблонов разных цветов. Под воздействием лазерного излучения на поверхности шпателя образуется оксидная пленка, из-за которой появляется структурный цвет.

С помощью лазерной абляции были изготовлены стилизованная картина Ван Гога «Звездная ночь», логотип «StructuralColor» разных цветов, буквы «У» черного, красного, золотого и серого цветов, несколько цветовых вариаций логотипа Чемпионата мира по футболу расцветок (рис. 6).



Рисунок 6. Готовые изображения, полученные окислением поверхности стальной подложки (изображения автора)

Были сделаны следующие выводы:

- 1) лазерная абляция – простой способ нанесения цветных изображений на металлы, состоящий из трех этапов:
 - а) создание графического эскиза;
 - б) подбор параметров для нужных цветов;
 - в) нанесение изображения на металл;
- 2) различные цвета получаются при изменении параметров лазера – скорости, мощности и количества проходов;
- 3) получившиеся логотипы можно использовать для создания уникальной сувенирной продукции, например, наносить на монеты, магниты, брелоки, кулоны и т.д.

Исследование структуры модифицированной лазерным излучением поверхности металлов при помощи оптической микроскопии

Цель: исследовать структуру поверхности логотипов с помощью оптической микроскопии, выявить особенности

Оборудование: оптический микроскоп PrimoStar (CarlZeiss).

Этап 1. Процесс создания логотипа

Логотип, как это было сказано выше, создается поэтапно. На Рис. 7 продемонстрированы оптические изображения различных этапов создания изображения. Вокруг логотипа видна рамка, которая нужна для того, чтобы в процессе лазерной абляции правильно совместить цвета.



Рисунок 7. Этапы создания логотипа для чемпионата мира по футболу (изображения автора)

Этап 2. Визуализация структуры изображений

На рисунке 8 представлены оптические изображения логотипов, полученные с увеличением 5х. Можно увидеть, что изображения состоят из оксидных пленок с неоднородным рельефом. Для разных цветов оксидные пленки различаются (рис. 8).

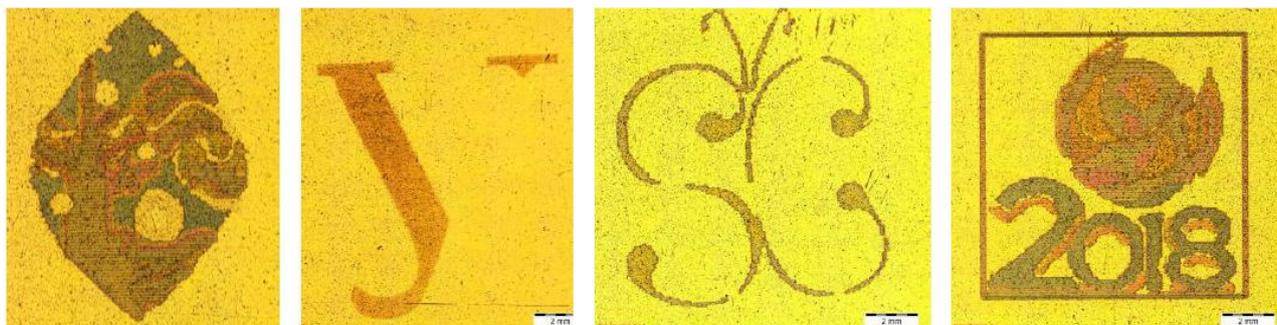


Рисунок 8. Оптические изображения логотипов (увеличение 5х) (изображения автора)

Этап 3. Детальное исследование особенностей морфологии различных цветов.

Структуры голубого, зеленого, розового и серого цветов полученные на стальной подложке были визуализированы с увеличением 20х и 100х. Построчное «закрашивание» области воздействия привело к образованию «углублений» и «полос», образовавшихся при термическом испарении и «микровзрывах» вещества под воздействием лазерного излучения (рис. 9А). «Полосы» имеют другой цвет, так как лазер нагревает поверхность рядом с уже созданной оксидной пленкой, изменяя ее толщину. Получены оптические изображения структур зеленого цвета (рис. 9В) и розового цвета (рис. 9Г).

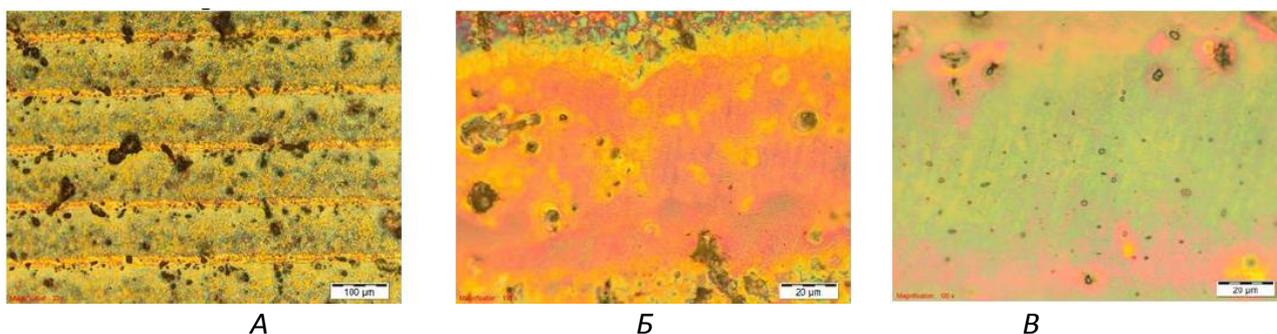


Рисунок 9. Оптическое изображение структур А – голубого цвета, Б – зеленого цвета, В – розового цвета (изображения автора)

На изображениях можно заметить темные пятна. Они возникают из-за неоднородности поверхности шпателя, и могут быть устранены при более тщательной подготовке образцов.

Оксидная пленка серого цвета нанесена равномерно без полос, оставленных лазером (рис. 10). Темных пятен практически не видно, на поверхности можно заметить зеленые и розовые разводы. На краю области воздействия оксидная пленка истончается и дает немного другой оттенок.

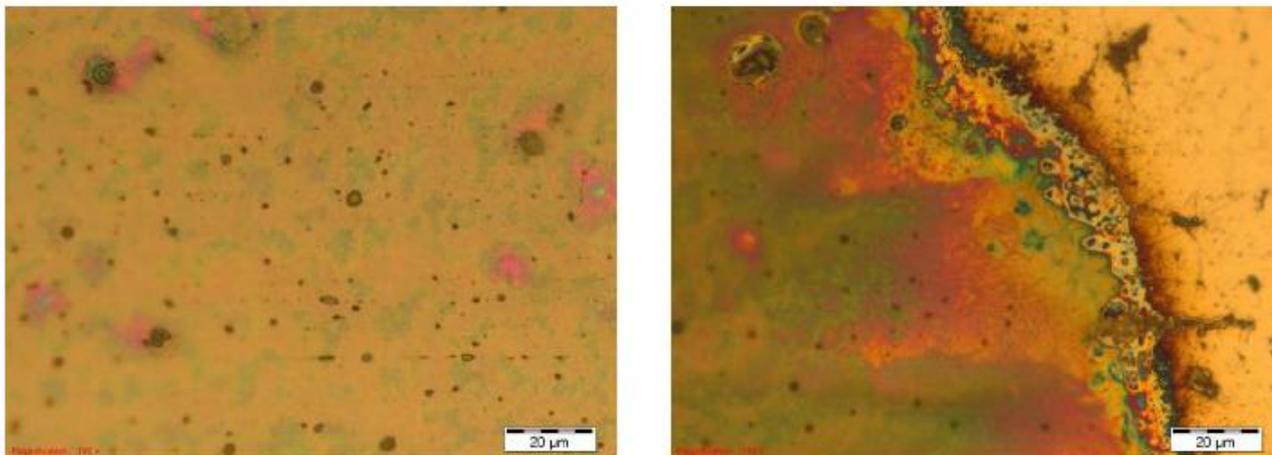


Рисунок 10. Оптическое изображение структур серого цвета (изображения автора)

В результате проделанной работы были сделаны следующие выводы:

- 1) Качество подготовки поверхности металла влияет на получаемый цвет (шероховатость, наличие дефектов, оксиды)
- 2) Глубина повреждения поверхности и толщина образовавшейся пленки зависят от мощности лазерного излучения и времени воздействия
- 3) Конечный цвет полученного изображения определяется степенью окисления металла и комбинацией различных находящихся по соседству микропленок
- 4) В зависимости от угла освещения модифицированная область может иметь разный оттенок, что отнесено за счет интерференции в тонких пленках

Выводы, заключение, перспективы

В ходе исследовательской работы над проектом «Нанотехнологии: создание изображения посредством структурного цвета» было изучено теоретическое обоснование возникновения структурных цветов при помощи сканирующей электронной и оптической микроскопии, выявлены особенности окраски крыльев бабочек и стрекоз, проведен сравнительный анализ способов создания структурных цветных изображений, а также методом лазерной абляции созданы несколько изображений на стальной подложке.

Цель найти и оптимизировать методику получения структурных изображений, применимых для изготовления уникальной сувенирной продукции была достигнута. Подтверждена выдвинутая гипотеза, согласно которой окрашивание ряда поверхностей определяется их сложным строением и микро- и наноразмерными особенностями рельефа.

В результате работы были сделаны следующие выводы:

- 1) Цвет может появляться не только из-за наличия красящих веществ, но и благодаря сложному строению материала;
- 2) Структурный цвет существует в природе: крылья некоторых животных и насекомых, опалы переливаются всеми цветами радуги из-за особого рельефа на поверхности;

- 3) Примерами искусственно созданного структурного цвета являются фотонные кристаллы, дифракционные решетки, тонкие пленки;
- 4) Структуры чешуек крыльев бабочек имеют сложное, разветвленное строение, состоящее из «балок», проходящих через всю длину чешуйки и соединенных между собой «перемычками»; у разных видов бабочек для схожих цветов морфология взаимоподобна; крыло стрекозы разделено прожилками на небольшие многоугольники, между которыми есть тонкая хитиновая структура, покрытая микро ворсинками. Переливы цветов достигаются за счет интерференции света;
- 5) При создании изображения на поверхности металла методом лазерной абляции качество подготовки поверхности влияет на получаемый цвет (шероховатость, наличие дефектов, оксиды); глубина повреждения поверхности и толщина образовавшейся пленки зависят от мощности лазерного излучения и времени воздействия; конечный цвет полученного изображения определяется степенью окисления металла и комбинацией различных находящихся по соседству микропленок; в зависимости от угла освещения модифицированная область может иметь разный оттенок, что отнесено за счет интерференции в тонких пленках
- 6) Полученные цветные изображения можно использовать для создания сувенирной продукции и украшений

В дальнейшем можно продолжить работу над проектом: исследовать и опробовать другие методы создания цветных изображений. Следует подробнее изучить возможности и сферы применения структурного цвета и нанотехнологий, пробовать применить их в будущем.

Список цитированных источников

1. A Boy And His Atom: The World's Smallest Movie [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=oSCX78-8-q0> Дата обращения: 22.10.2017
2. Аверьянов В. В. Шелкография. Практическое пособие по трафаретной печати //Аверьянов ВВ. – 1998.
3. Бердоносков С. С., Горелик А. Г. Сублимация в современных химических технологиях: проблемы и достижения //Химическая промышленность. – 1993. – №. 8. – С. 391.
4. Бриттон Г. Биохимия природных пигментов: Пер. с англ. — М.: Мир, 1986. — 422 с
5. Гребёнкин М.Ф., Лобова Л.П. Сравнительный анализ углеродных наноструктур от бензола до графита // Преподаватель XXI век. 2013. №3. С.224-228
6. Жакупов А. А. Разработка проекта технологического участка трафаретной печати для Издательского центра ФГБОУ ВПО ЮУрГУ (НИУ) : дис. – Южно-Уральский государственный университет, 2016.
7. Зиганшин А. У., Зиганшина Л. Е. Наночастицы: фармакологические надежды и токсикологические проблемы // Казанский мед. ж.. 2008. №1. С.1-7
8. Изубков Л. А., Романов В. П. Критическая опалесценция //Успехи физических наук. – 1988. – Т. 154. – №. 4. – С. 615-659.
9. Калинин Д.В., Сердобинцева В.В. От благородного опала к нанопленкам // Наука из первых рук. 2007. №4 (16). С.22-27
10. Кричевский Г.Е. Структурная окраска // ХиЖ. 2010. №11. С.31-38
11. Кузнецова М. А., Лучинин В. В., Савенко А. Ю. Физико-технологические основы применения наноразмерной ионно-лучевой технологии при создании изделий микро- и наносистемной техники //Нано-и микросистемная техника. – 2009. – №. 8. – С. 24-32.
12. Лозинская А. П. и др. Печати в Российской Федерации: современное состояние и перспективы. – 2011.
13. Могильницкий Б. С., Симонова Г. В. О разрешении дифракционной решетки //

- Интерэкспо Гео-Сибирь. 2013. №2. С.88-92
14. Новикова Л. В., Иванушкина И. Ю. Влияние цвета и света на человека // Биомедицинская инженерия и электроника. 2012. №2 (2). С.75-77
 15. Разумовская И. В. Нанотехнология основа третьей научно-технической революции // Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина. 2008. №20. С.102-123
 16. Саврухин А.П. Природа света // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2014. №4 (104). С.206-223
 17. Старостин В. В. Материалы и методы нанотехнологий // ВВ Старостин.–М. – 2008.
 18. Терентьева Г. П. История развития терминологии нанотехнологий // Известия ВГПУ. 2012. №-8. С.115-117
 19. Хисамутдинов, Т. Р. (2016). Разработка и технологический процесс изготовления сувенирных изделий (Doctoral dissertation, Южно-Уральский государственный университет).
 20. Шалимова Л. А., Насонова Л. И. Теория изучения цвета // Вестник БГУ. 2012. №6. С.65-68.
 21. Шевченко В. Я., Гусаров В. В., Данилевич Я. Б., Жабров В. А. От фундаментальных исследований к разработке новых материалов и технологий // Инновации. 2008. №6. С.44-49
 22. Штанский Д. В. Многофункциональные наноструктурированные пленки // Успехи химии. – 2007. – Т. 76. – №. 5. – С. 501-509.
 23. Яников М. В., Романов С. Г., Соловьёв В. Г. Изучение оптических свойств фотонных кристаллов и основ наноплазмоники в университетском курсе физики // Вестник Псковского государственного университета. Серия: Естественные и физико-математические науки. 2013. №2. С.205-213