Laser Optics 2014

Лазерное формирование цветного изображения на металлической поверхности методом локального окисления

Вейко В.П, Юдин К.В.
Одинцова Г.В., Карлагина Ю.Ю.
Логинов А.В., Скуратова А.Л.

Университет ИТМТО, Санкт–Петербург

Актуальность технологии цветной лазерной маркировки (ЦЛМ) - возможные применения

Приборостроение, в том числе медицинская техника

Машиностроение

Коллекционное оружие

Произведения декоративно-прикладного искусства

Рекламный бизнес

- **декоративный эффект;**
- **идентификация;**
- **защита от фальсификации;**
- **защитный оксидный слой;**
- **кодирование информации.**

Актуальность технологии ЦЛМ
Сравнение различных технологий нанесения цветного изображения на металлическую поверхность

Традиционные способы

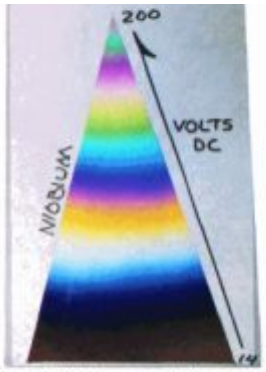
порошковая окраска, термопечать, анодирование [1], тепловое и термохимическое окисление

Импульсное лазерное воздействие

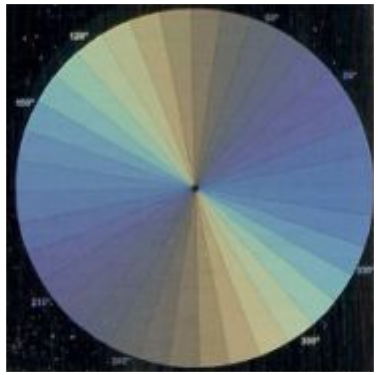
структурирование [2]

окисление [3]

а)



б)



в)

а) цвета побежалости, полученные при анодировании на поверхности ниобия и при термическом окислении на стружке стали, б) цвета на поверхности стали при облучении импульсами фемтосекундной длительности, полученные при использовании излучения с различной поляризацией, в) цвета, полученные на поверхности стали за счет ее окисления Nd: YAG лазером (1,06 мкм, 100 нс)

[1] E. Gaul, “Coloring titanium and related metals by electrochemical oxidation,” J. Chem. Educ., vol. 70, no. 3, p. 176, Mar. 1993.
[2] A. Y. Vorobyev, C. Guo, “Colorizing metals with femtosecond laser pulses,” Appl. Phys. Lett., vol. 92, no. 4, p. 041914, Jan. 2008.
[3] A. J. Antończak, D. Kocoń, M. Nowak, P. Kozioł, K. M. Abramski, “Laser-induced colour marking—Sensitivity scaling for a stainless steel,” Appl. Surf. Sci., vol. 264, pp. 229–236, Jan. 2013.

Цель и задачи работы

Цель: разработка технологии управляемого изменения цвета поверхности металлов методом локального лазерного окисления, т.е. установление однозначной, закономерной и устойчивой связи между параметрами лазерного воздействия и цветом поверхности

Существующие проблемы и задачи исследования:

- механизм возникновения цвета: интерференционные эффекты или собственный цвет окисла
- состав образующихся пленок, которые соответствуют одному и тому же цвету на определенном металле
- алгоритм и программа ЦЛМ

Экспериментальная установка и материалы для исследований

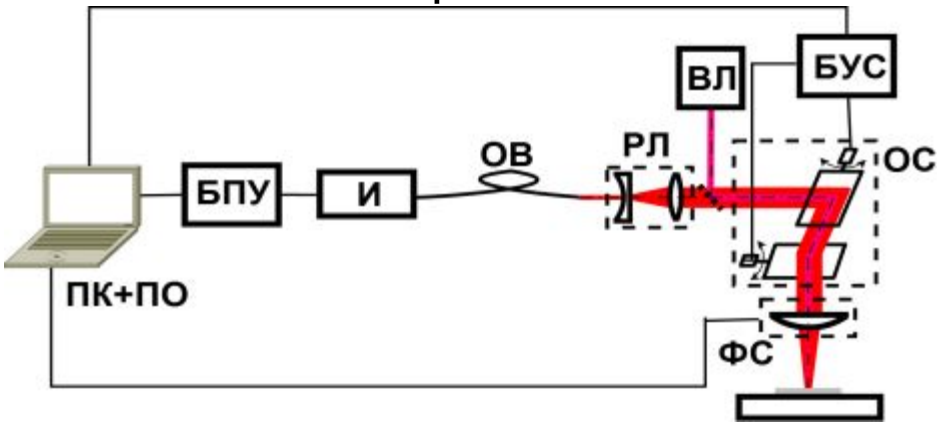
Материалы для исследований:

-нержавеющая сталь марки12Х18Н10Т;

-технический титан ВТ1-0.

Экспериментальная установка

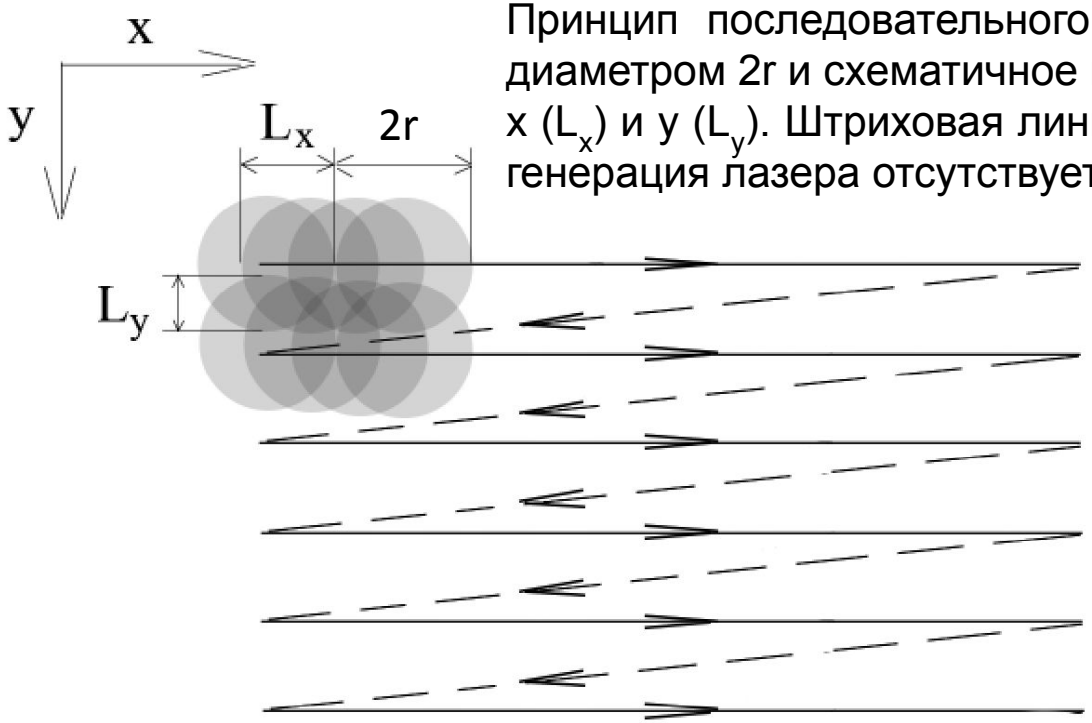
на базе иттербиевого импульсного волоконного лазера ИЛМИ - 20



Параметры лазерной установки	Значение
Длина волны λ, мкм	1,06
Длительность импульса τ, нс	100
Диаметр пятна в фокусе $2r$, мкм	50
Частота следования импульсов f, кГц	20-99
Скорость сканирования $V_{ск}$, мм/с	1-250
Средняя мощность $P_{ср}$, Вт	1-20
Разрешение N, линий на мм	20-200

ПК – персональный компьютер; ПО – программное обеспечение; БУС – блок управления сканаторами; БПУ – блок питания и управления лазера; И – излучатель; ОВ – оптическое волокно; РЛ – расширитель луча; ВЛ – визуализирующий лазер (λ=0,65 мкм); ОС – отклоняющая система (2 гальванометрических сканатора «GSI Lumonics»); ФС – фокусирующая система (Linos F-Theta-Ronar F-160мм,1064нм).

Параметры лазерного воздействия, определяющие цвет поверхности



Принцип последовательного сканирования лазерного пучка диаметром 2r и схематичное изображение перекрытия по осям x (L_x) и y (L_y). Штриховая линия – холостой ход (в этот момент генерация лазера отсутствует).

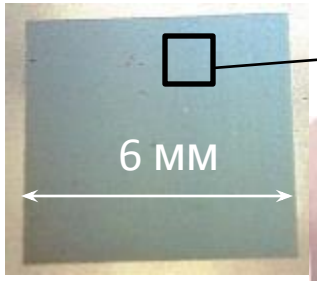
$$q = \frac{P_{\text{ср}}}{f \cdot \tau \cdot \pi \cdot r^2}$$

$$L_x = \left(1 - \frac{V_{\text{ск}}}{f \cdot 2r}\right) \cdot 100\%$$

$$L_y = \left(1 - \frac{1}{N \cdot 2r}\right) \cdot 100\%$$

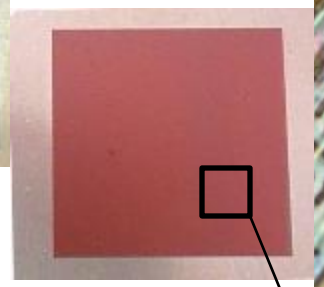
Один и тот же цвет поверхности можно получить при различных комбинациях плотности мощности (q), перекрытия по оси x (L_x) и перекрытия по оси y (L_y).

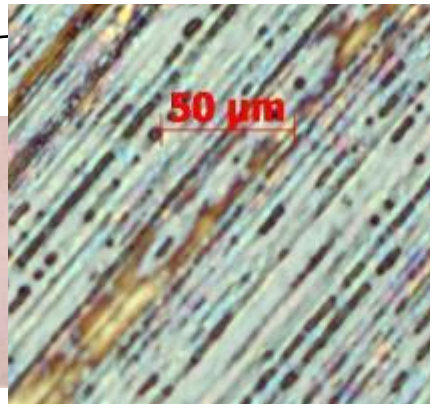
Цвет поверхности – «интегральный цвет» микроскопических областей

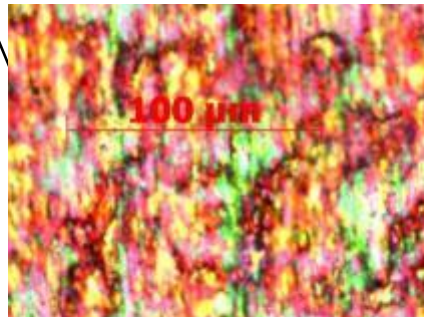


а)

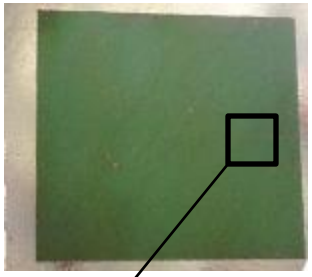
б)

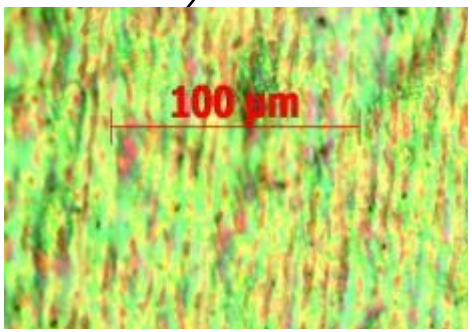






в)





- значения L_x и L_y в диапазоне от 80 до 99 % (обеспечивает более равномерный нагрев)
- значения q
$=2{,}91*10^{11}$ Вт/м^2 (сталь)
$=1{,}24*10^{11}$ Вт/м^2 (титан)
(максимально возможная производительность процесса)

Цвета, полученные окислением поверхности нержавеющей стали под воздействием лазерного излучения : $q=2{,}91*10^{11}$ Вт/м^2,
а) L_x = 91%, L_y=90%, б) L_x = 97%, L_y=90%,
в) L_x = 98%, L_y=90%,

Определение состава образующихся пленок

Определение энергии Гиббса для реакции

1) Энергия Гиббса для каждого из реагентов системы[8]:

$$\Delta G_{T_{\text{реагент}}} = \Delta_f H^0(P_0, T_0) - TS^0(P_0, T_0) - \sum_{j=1}^{k}\left[T\int_{T_{j-1}}^{T_j}\frac{C_j^0(P_0,t)}{t}dt - \int_{T_{j-1}}^{T_j} C_j^0(P_0,t)dt\right]$$

2) Энергия Гиббса с учетом парциального давления газа в смеси и мольной доли компонента:

$$\Delta G_T = \Delta G_{T_{\text{реагент}}} + RT(\ln P + \ln X)$$

3) Энергия Гиббса для всей системы:

$$\Delta G_{\text{реакции}} = \sum_j (\nu_j \Delta G_{\text{Т}})_{\text{продукты}} - \sum_i (\nu_i \Delta G_{\text{Т}})_{\text{исх.комп.}}$$

Чем меньше энергия Гиббса реакции, тем выше вероятность её протекания.

$\Delta_f H^o(P_0, T_0)$ – изменение энтальпии реагента при стандартных условиях;
$S^o(P_0, T_0)$ – изменение энтропии реагента при стандартных условиях;
T – температура нагревания реакции;
t – текущая температура;
$C^o(P_0, t)$ – зависимость изобарной теплоемкости от температуры;
R – газовая постоянная;
P – парциальное давление газа в смеси;
X – мольная доля компонента в содержании стали;
v_i, v_j – стехиометрические коэффициенты реакции.

[8] Слободов А.А., “Возможности и эффективность термодинамического физико-химического моделирования химико-технологических систем и процессов,” Известия СПбГТИ(ТУ), no. 5 (31), pp. 26–31, 2009.

Система сталь 12Х18Н10Т – воздух. Реакции взаимодействия компонентов стали и воздуха

$$\left\{\begin{matrix} Fe \\ Cr \\ Ni \\ C \end{matrix}\right\} + \left\{\begin{matrix} N_2 \\ O_2 \\ H_2O \\ CO_2 \end{matrix}\right\}$$

Продукты реакции, а также реагенты и соответствующие стехиометрические коэффициенты для взаимодействия компонентов стали и воздуха.

Продукт	Fe	Cr	Ni	O_2
FeO	1	0	0	0,5
Fe_2O_3	2	0	0	1,5
Fe_3O_4	3	0	0	2
NiO	0	0	1	0,5
CrO_3	0	1	0	1,5
CrO_2	0	1	0	1
Cr_2O_3	0	2	0	1,5
Cr_5O_{12}	0	5	0	6
Cr_8O_{21}	0	8	0	10,5
Fe_2NiO_4	2	0	1	2
Cr_2FeO_4	1	2	0	2
Cr_2NiO_4	0	2	1	2

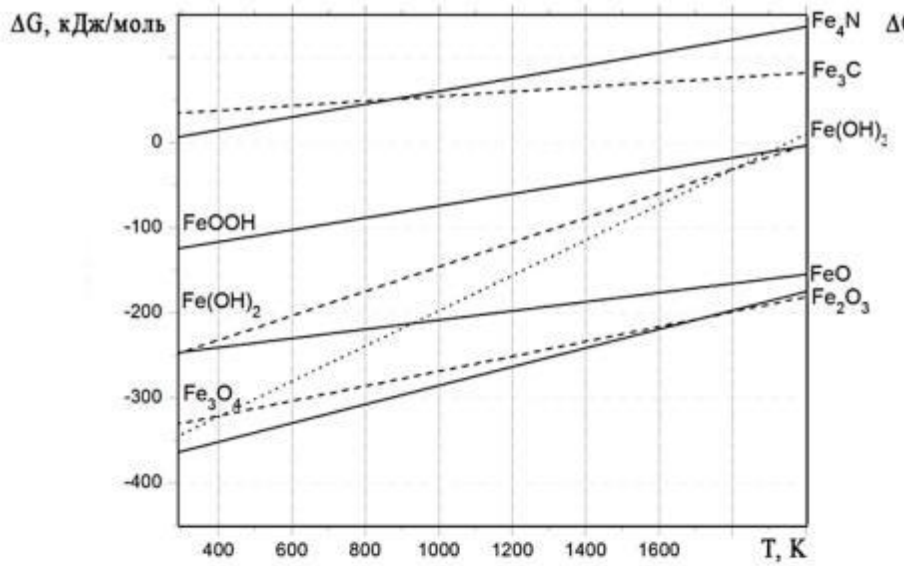
Продукт	Fe	Cr	Ni	C
Fe_3C	3	0	0	1
Cr_3C_2	0	3	0	2
Cr_7C_3	0	7	0	3
$Cr_{23}C_6$	0	23	0	6
Ni_3C	0	0	3	1

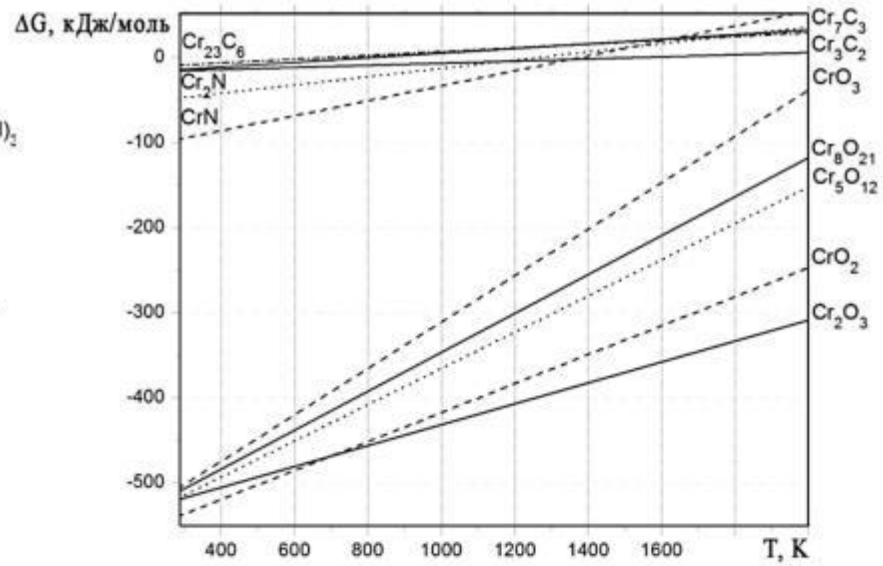
Продукт	Fe	Cr	Ni	N_2
Fe_4N	4	0	0	0,5
Cr_2N	0	2	0	0,5
CrN	0	1	0	0,5

Продукт	Fe	H_2O	O_2
FeOOH	1	0,5	0,75
$Fe(OH)_2$	1	1	0,5
$Fe(OH)_3$	1	1,5	0,75

Система сталь 12Х18Н10Т – воздух. Расчет энергии Гиббса реакций при воздействии одиночных импульсов

Зависимость энергии Гиббса образования оксидов, гидроксидов, карбидов и нитридов железа и хрома от температуры.





Температура, К	Состав
298-700	Fe_2O_3, CrO_2, NiO
700-1750	Fe_2O_3, Cr_2O_3, NiO
1750-2000	Fe_3O_4, Cr_2O_3, NiO

Обоснование применимости методов химической термодинамики для анализа импульсного лазерного воздействия

1) Процесс импульсного лазерного нагрева по своему результату эквивалентен нагреву непрерывным излучением при максимальной на данном временном интервале температуре $T_{макс}$, которая поддерживается на протяжении некоторого эквивалентного времени $t_{экв}$ [7].

$$T_{\text{макс}} = \frac{2 \cdot q \cdot (1 - R) \cdot \sqrt{a \cdot \tau}}{\sqrt{\pi} \cdot k} \qquad t_{\text{экв}} = \frac{2 \cdot T_{\text{макс}}^2}{T_{\text{а}} \cdot (T_{\text{макс}} - T_{\text{н}})}$$

Материал	$T_{макс}$, K	$t_{экв}$, мкс
Сталь 12Х18Н10Т	1237	0,88-10,54
Титан ВТ1-0	987	2,63-9,57

R – коэффициент отражения;
a – температуропроводность;
k - теплопроводность;
T_a – температура активации;
$T_н$ – начальная температура.

2) Использование режимов облучения с большим перекрытием по оси x и по оси y позволяет в значительной степени уменьшить градиенты и сгладить неоднородности распределения температуры поверхности.

[7] Либенсон М.Н. “Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние,” М.: Наука, 2007, 424 с.

Система сталь 12Х18Н10Т – воздух. Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Расчетный состав образующихся пленок.

$T_{макс}$, K	$t_{экв}$, мкс	Слой 1 (пленка - подложка)	Слой 2 (воздух - пленка)
1237	0,88-1,54	Cr_2O_3, NiO	Fe_2O_3
		$FeCr_2O_4$, NiO	

Количество импульсов ↓

Состав образующихся пленок, определенный методом Оже-спектроскопии[9].

$T_{макс}$, K	$t_{экв}$, мкс	Слой 1 (пленка - подложка)	Слой 2 (воздух - пленка)
1210	1,02	Cr_2O_3	Fe_2O_3
		$FeFe_{2-x}Cr_xO_4$, где x – от 0 до 2	

Количество импульсов ↓

[9] T. R. Jervis, D. L. Williamson, J.-P. Hirvonen, and T. G. Zocco, “Characterization of the surface oxide formed by excimer laser surface processing of AISI 304 stainless steel,” Mater. Lett., vol. 9, no. 10, pp. 379–383, Jun. 1990.

Система титан ВТ1-0– воздух. Сравнение теоретических и экспериментальных данных

Состав образующихся пленок, полученный расчетным путем.

Количество импульсов

$T_{макс}$, K	$t_{экв}$, мкс	Слой 1 (пленка - подложка)	Слой 2 (воздух - пленка)
987	2,63-9,57	Ti, TiO, (TiC)	-
		TiO, Ti_2O_3, (TiC)	TiO_2

Состав образующихся пленок, определенный методом спектроскопии вынужденного комбинационного рассеяния[10].

Оттенок цвета	$T_{макс}$, K	$t_{экв}$, мкс	Слой 1 (пленка - подложка)	Слой 2 (воздух - пленка)
Золотой	970	2,58	TiO,Ti_2O	-
Коричневый		3,87	Ti_2O_3, TiO,Ti_2O	TiO_2
Фиолетовый		5,27		
Синий		8,44		

[10] A. Pérez del Pino, P. Serra, and J. . Morenza, “Coloring of titanium by pulsed laser processing in air,” Thin Solid Films, vol. 415, no. 1–2, pp. 201–205, Aug. 2002.

Вывод

Цвет поверхности стали и титана на воздухе при импульсно-периодическом лазерном воздействии, приводящем к ее окислению, определяется как интерференционными эффектами в тонком верхнем оксидном слое: Fe_2O_3 (для стали), TiO_2 (для титана), так и собственным цветом окислов в нижнем слое: $FeCr_2O_4$ (для стали), Ti_2O_3 и TiO (для титана).

Нахождение интегрального параметра процесса лазерного окрашивания (окисления) поверхности металлов, обеспечивающего однозначную связь между параметрами облучения и цветом поверхности в заданной локальной области

Интегральный параметр процесса лазерного окрашивания (окисления) поверхности металлов

Самая медленная стадия процесса окисления – встречная диффузия атомов кислорода и металла через слой первоначального окисла.

Процесс диффузии контролируется температурой и временем, поэтому физическим критерием цветности поверхности металлов при лазерном окислении должна быть некая комбинация температуры $T(N_x)$ и времени воздействия $t_{эфф\ x,y}$ – С:

$$C = f\left(T(N_x), t_{\text{эфф}\ x,y}\right)$$

Экспериментальным путем было обнаружено, что при меньшей температуре, но более длительном времени нагрева возможно образование того же цвета поверхности, что и при большей температуре нагрева, но при меньшем времени воздействия.

Технологический критерий цветности $C_Ц$

$$C_{ц} = T(N_x) \cdot t_{эфф\ x,y}$$

- $T(N_x)$ - температура, до которой нагревается поверхность образца при облучении N импульсами[11]:

$$T(N_x) = \frac{2 \cdot q \cdot (1-R) \cdot \sqrt{a}}{k \cdot \sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=0}^{N_x} \left[\sqrt{t(N_x) - \frac{n}{f}} - \sqrt{t(N_x) - \left(\frac{n}{f} + \tau\right)} \right] + T_н$$

- $t_{эфф\ x,y}$ – эффективное время воздействия на единицу поверхности пятном излучения, диаметром 2r:

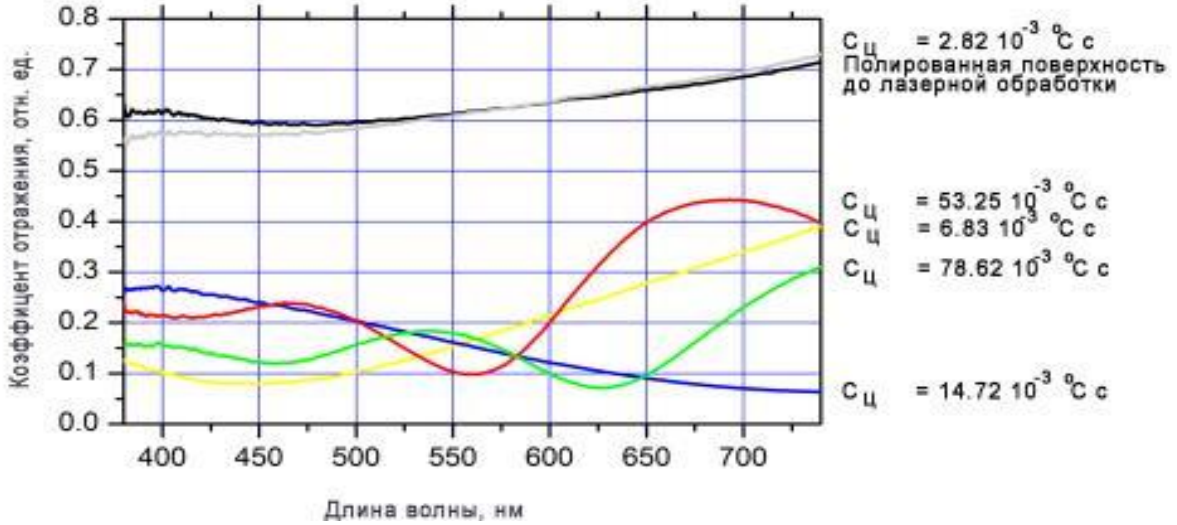
$$t_{эфф\ x,y} = N_x \cdot N_y \cdot \tau = (1 - L_x) \cdot (1 - L_y) \cdot \tau = \frac{(2r)^2 \cdot \tau \cdot f \cdot N}{V_{ск}}$$

где $t(N_x)=N_x/f+\tau$,
N_x, N_y – число импульсов на единицу поверхности пятном излучения диаметром 2r, с учетом перекрытия по осям x и y.

[11] Шахно Е.А. “Аналитические методы исследования и разработки лазерных микро– и нанотехнологий: методические рекомендации по выполнению курсовых проектов и самостоятельных работ студентов “, СПбГУ ИТМО, 2008. 66 с.

Спектры отражения стали и титана до и после лазерной обработки

Нержавеющая сталь 10Х18Н10Т.



Технический титан ВТ1-0.

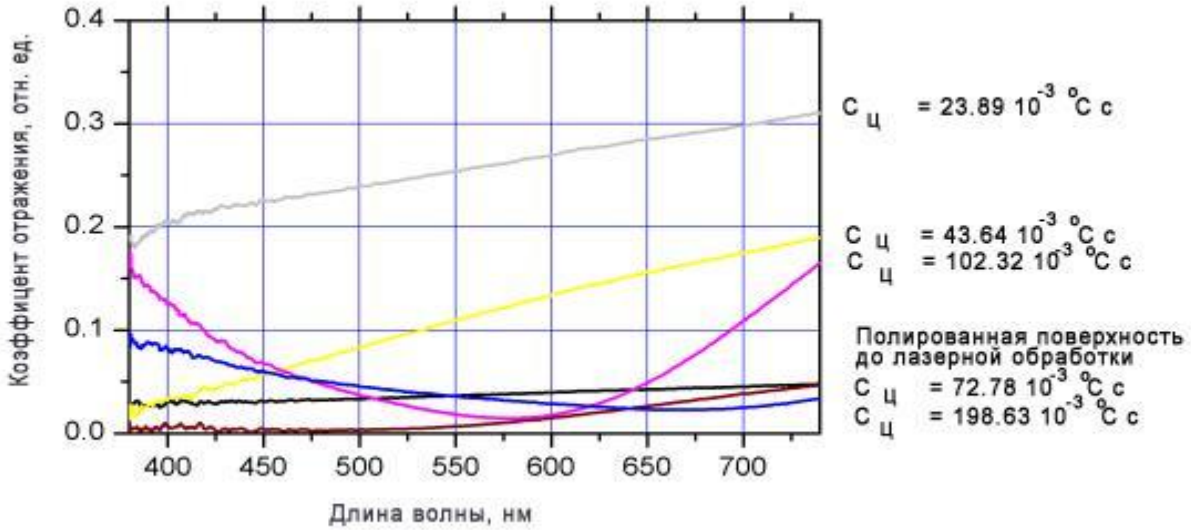
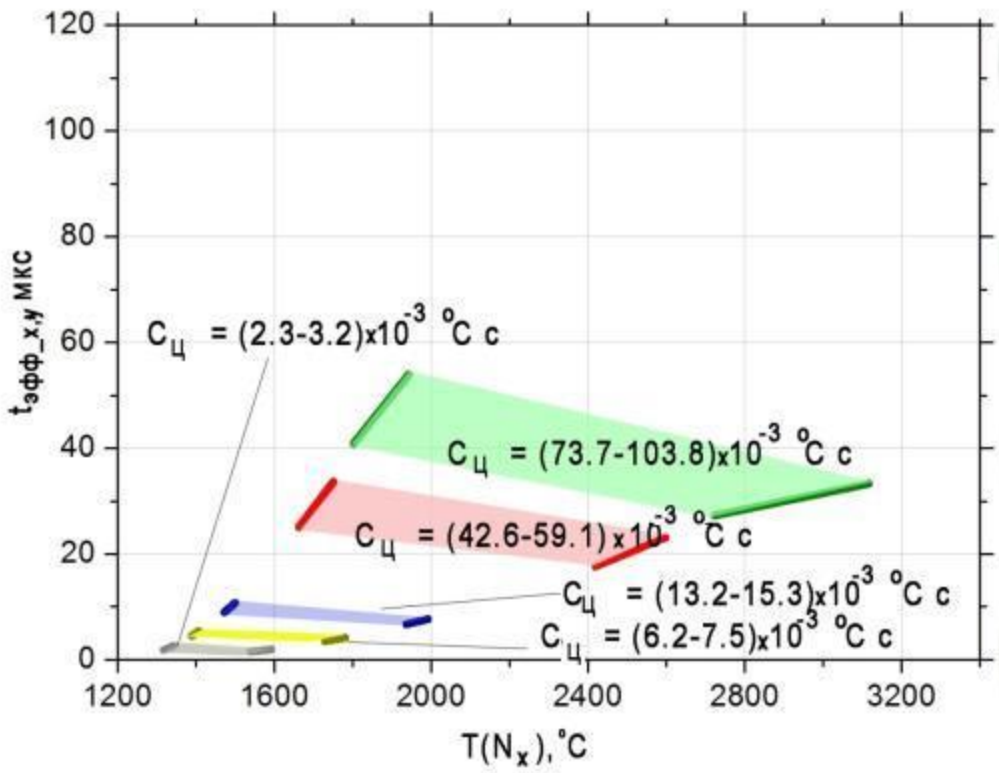


Диаграмма цветов на поверхности нержавеющей стали 10Х18Н10Т



Зеленый
$C_ц$ =78.62 10^{-3} °C c
x' = 17.56
y' = 21.22
z' = 18.63
x_{10} = 0.31
y_{10} = 0.37

Красный
$C_ц$ =53.25 10^{-3} °C c
x' = 29.64
y' = 23.45
z' = 32.24
x_{10} = 0.35
y_{10} = 0.28

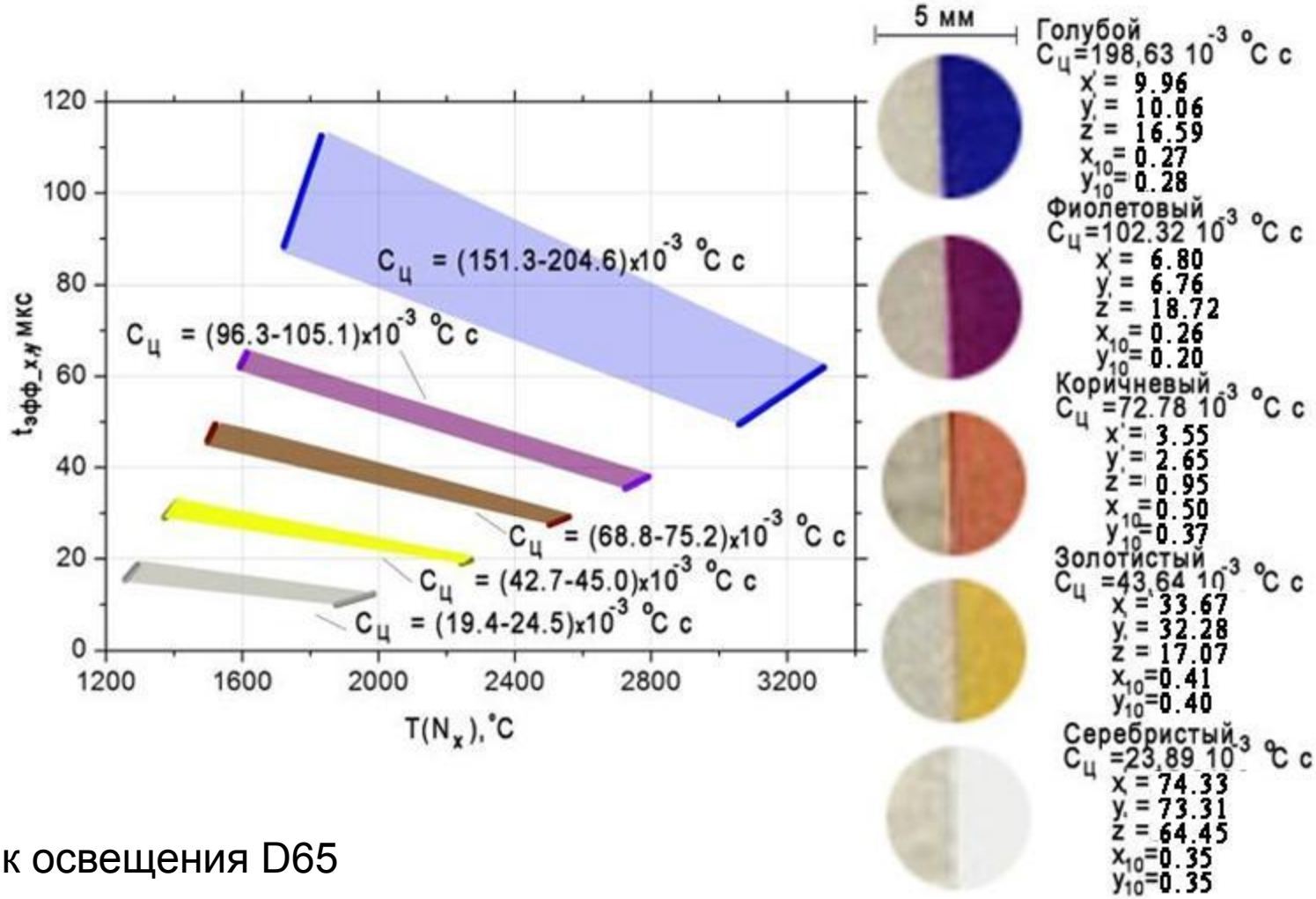
Голубой
$C_ц$ =14.72 10^{-3} °C c
x' = 20,98
y' = 22,21
z' = 33,67
x_{10} = 0,28
y_{10} = 0,29

Золотистый
$C_ц$ = 6.83 10^{-3} °C c
x' = 26,60
y' = 23,78
z' = 12,14
x_{10} = 0,44
y_{10} = 0,38

Серебристый
$C_ц$ =2,82 10^{-3} °C c
x' = 88,98
y' = 87,72
z' = 81,89
x_{10} = 0,34
y_{10} = 0,34

Источник освещения D65

Диаграмма цветов на поверхности технического титана ВТ1-0



Источник освещения D65

Соотношение цвета и состава пленок, полученных при импульсном лазерном воздействии

Слой / цвет	Нержавеющая сталь 10Х18Н10Т		Технический титан ВТ1-0	
	Золотистый	Голубой Красный Зеленый	Золотистый	Коричневый Фиолетовый Голубой
Слой 2 (воздух - пленка)	-	Fe_2O_3 (интерференционный механизм)	-	TiO_2 (интерференционный механизм)
Слой 1 (пленка - подложка)	Cr_2O_3 (интерференционный механизм)	$FeCr_2O_4$, NiO (собственный цвет окисла)	TiO (собственный цвет окисла)	TiO, Ti_2O_3, Ti, TiC (собственный цвет окисла)

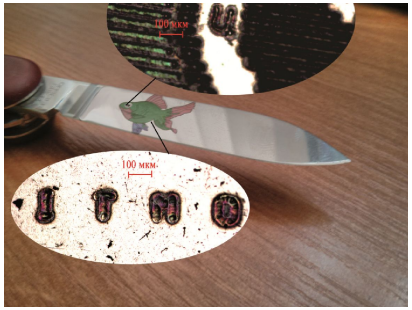
Разработка технологии нанесения цветного изображения на поверхность металлов на базе серийно выпускаемой установки для промышленной лазерной маркировки

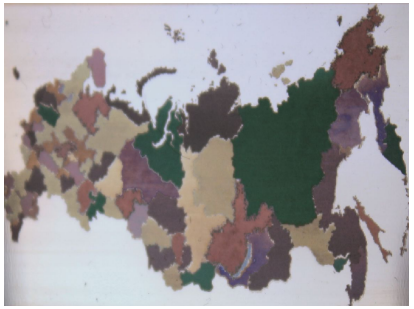
Технология ЦЛМ для металлов (Акт внедрения 01-32 от 22.01.2014)

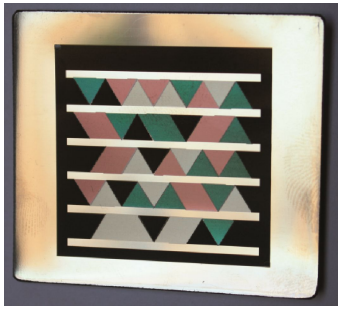
- диаграмма цветов и технологического критерия цветности поверхности нержавеющей стали 10Х18Н10Т и технического титана ВТ1-0;
- методика расчета технологического критерия цветности для других металлов и сплавов;
- колориметрические характеристики основных цветов поверхности нержавеющей стали 10Х18Н10Т и технического титана ВТ1-0;
- программное обеспечение для технологии цветной лазерной маркировки «Color Layer Splitter» **(Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014614446 от 24 апреля 2014 г.).**

Образцы ЦЛМ, полученные с помощью созданного ПО

Нержавеющая сталь 10Х18Н10Т







Технический титан ВТ1-0

Выводы

- Метод химической термодинамики с учетом кинетических ограничений может быть применен для расчета фазово-химического состава пленок, полученных в процессе взаимодействия металлов с атмосферными газами при лазерном нагревании последовательностью импульсов наносекундной длительности.
- Цвет поверхности стали и титана на воздухе после импульсно-периодического лазерного воздействия, приводящего к ее окислению, определяется как интерференционными эффектами в тонком верхнем оксидном слое: Fe_2O_3 (для стали), TiO_2 (для титана), так и собственным цветом веществ в нижнем слое: $FeCr_2O_4$ (для стали), Ti_2O_3 и TiO (для титана).
- Параметром, характеризующим образование оксидной пленки того или иного цвета, является предложенный критерий цветности $C_Ц$, учитывающий как температуру поверхности образца, создаваемую воздействием серии лазерных импульсов $T(N_x)$, так и эффективное время воздействия $t_{эфф\ x,y}$: $C_Ц = T(N_x) \cdot t_{эфф\ x,y}$

Спасибо за внимание!

Основные результаты опубликованы в следующих работах:

Работы в международных научных изданиях, которые включены в перечень зарубежных научных журналов и изданий для опубликования основных научных результатов диссертации:

- Veiko V.P., Slobodov A.A., Odintsova G.V. Availability of methods of chemical thermodynamics and kinetics for the analysis of chemical transformations on metal surfaces under pulsed laser action // Laser Phys. 2013. V. 23. P. 066001-1-6;
- Gorny S.G., Odintsova G.V., Otkeeva A.V., Veiko V.P. Laser induced multicolor image formation on metal surfaces // Proc. of SPIE. 2011. V. 7996. P. 799605-1-7.

Научные журналы и издания, которые включены в перечень ВАК:

- Вейко В.П., Слободов А.А., Одинцова Г.В. Определение химических и фазовых превращения при импульсном лазерном облучении многокомпонентных сплавов на воздухе методами химической термодинамики // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2013. Т. 84. № 2. С. 114-119;
- Вейко В.П., Горный С.Г., Одинцова Г.В., Патров М.И., Юдин К.В. Формирование многоцветного изображения на поверхности металлов при ее лазерном окислениия // Известия вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 2. С. 47-52.

Научно-технические журналы:

- Горный С., Вейко В., Одинцова Г., Горбунова Е., Логинов А., Карлагина Ю., Скуратова А., Агеев Э. Цветная лазерная маркировка поверхности металлов // Научно технический журнал «Фотоника». 2013. № 6. С.34-44.

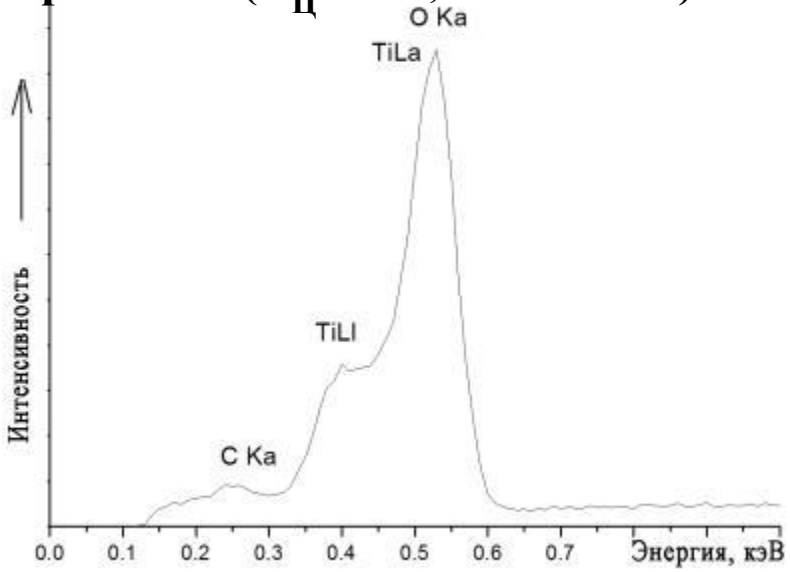
Энергодисперсионная рентгеновская спектроскопия

На базе растрового электронного микроскопа Inspect FEICompany
- площадь воздействия 10 х 10 мм,
- глубина проникновения 1 мкм.

Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (массовая доля каждого компонента из смеси) поверхности нержавеющей стали до и после лазерной обработки:

$C_Ц$ *10^{-3} C*c	Fe	Cr	Ni	O
Сталь до обработки	72,76	18,80	8,44	-
6,83	64,13	15,26	7,74	12,87
53,25	59,71	13,30	7,49	19,50
78,62	59,57	12,04	7,64	20,75

Результаты энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии поверхности титана после лазерной обработки ($C_Ц$ =198,63*10^{-3} C*c)



Испытания образцов

Материал: AISI 304.
Лазерный источник: Yb-волоконный лазером(λ=1062 нм,τ=100 нс,d_0=40 мкм,$P_{ср}$ <20 Вт).

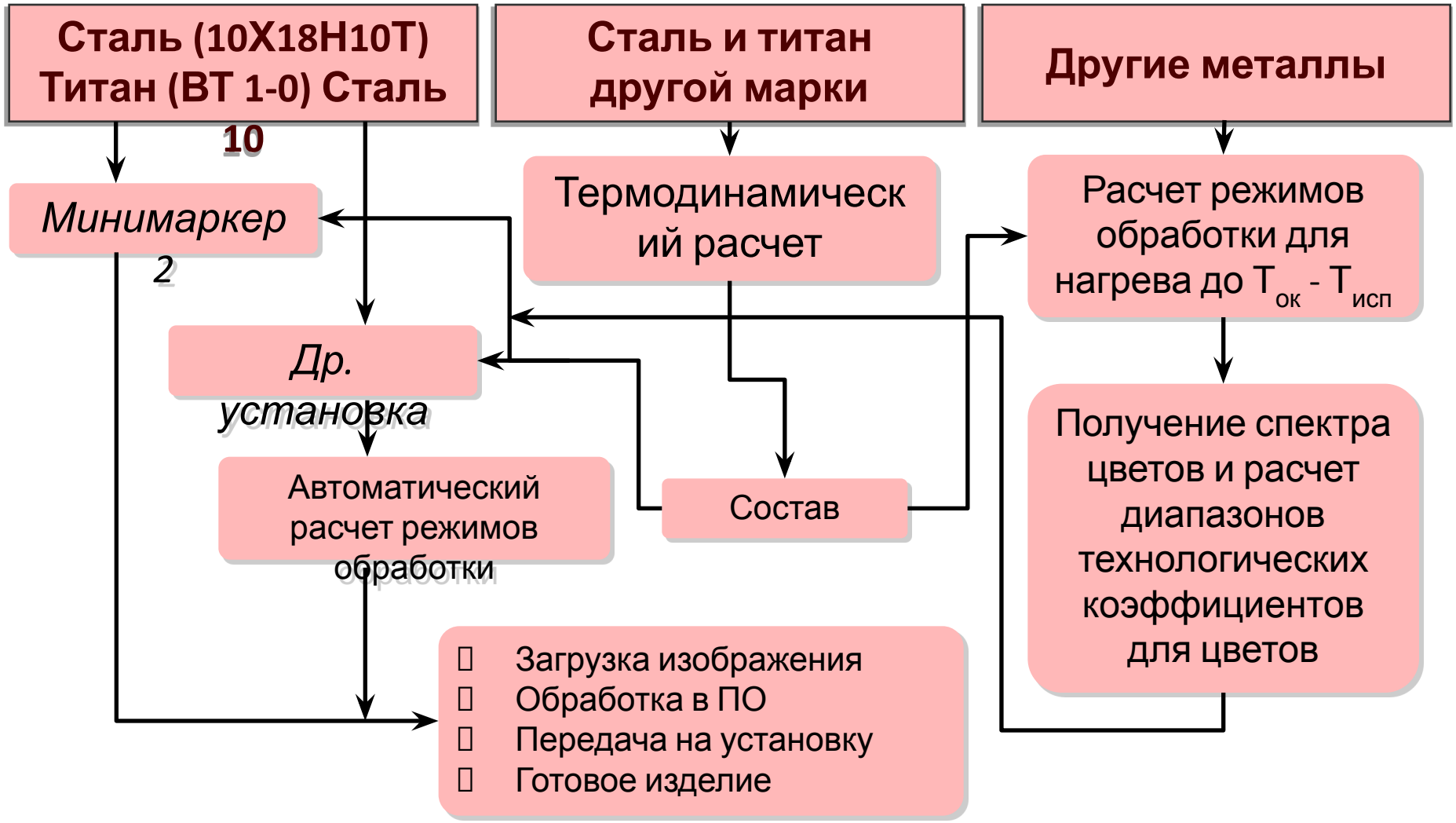
1) Нагрев от 0 до 40 ℃[13]
Регулятор нагрева пластины: термонагревательный элемент TEC.
Вывод: цвета, полученные на поверхности стали при нагревании, не имеют изменений.

2) Тест на старение [14] - приблизительно 4-5 месяцев облучения солнечным светом в умеренном климате
Оборудование: камера ATLAS MTT Type Ci65 с ксеноновой лампой.
Время облучения: 323 часа.
Вывод: цвета, полученные на поверхности стали, не имеют изменений

3) «Солевой» тест - пребывание образца в агрессивных средах (высокая влажность и температура, агрессивные загрязняющие вещества в атмосфере) в течение 2 лет.
Оборудование: соляной раствор (5% концентрация) распылялся на образец в соляной камере в течение 2 часов при температуре 35±5°C. Затем в течение следующих 22 часов образец сушился в открытой камере. Данная процедура была проделана неоднократно.
Вывод: цвета, полученные на поверхности стали, покрылись ржавчиной

[13] Antonczak A.J., Kocon D., Nowak M., Kozioł P., Abramski K.A. Laser-induced color marking—Sensitivity scaling for a stainless steel // Applied Surface Science, 2013, V. 264, P.229—236.
[14] Афонькин М.Г., Ларионова Е.В. Применение современных технологий при декорировании художественных изделий из металла // Журнал «Дизайн. Материалы. Технология», 2009, Т. 3, № 10, С.3—8.

Последовательность действий при создании цветного изображения на металлах при облучении импульсным волоконным лазером



Сравнение технологии цветной лазерной маркировки с существующими методами окрашивания (маркетинговый анализ)

Сводная таблица индексов конкурентоспособности

Технология	$I_ж$	$I_м$	$I_{кс}$	Место
Термопечать	0.180	0.450	0.317	1
Порошковая окраска	-0.030	-0.020	-0.027	4
Анодное, тепловое, электрохимическое окисление	-0.020	0.010	-0.007	3
Цветная лазерная маркировка	0.200	-0.003	0.098	2

<u>Жесткие технологические параметры</u>

- минимальный размер получаемого элемента;
- количество производственных этапов;
- цветность (количество возможных цветов и оттенков);
- возможность бесконтактного воздействия на материал;
- стойкость знаков.

<u>Мягкие технологические параметры</u>

производительность технологического процесса; рыночная стоимость технологической установки; экологичность технологического процесса с учётом количества химических отходов в процессе производства и их вреда для окружающей среды.

Технологии нанесения цветного изображения на поверхность металлов

Термопечать

Преимущества технологии:

1. высокая производительность при больших тиражах;
2. большая палитра цветов;
3. низкая стоимость установки
4. экологичность.

Недостатки технологии:

1. низкая долговечность покрытий;
2. низкое разрешение изображения;
3. обязательное изготовление трафаретов;
4. контактное воздействие на материал.

Порошковая окраска

Преимущества технологии:

1. высокая производительность при больших размерах изделия;
2. большая палитра цветов;
3. бесконтактное воздействие на материал.

Недостатки технологии:

1. низкая долговечность покрытия;
2. низкое разрешение изображения;
3. невозможность нанесения более одного цвета за один цикл;
4. отрицательное воздействие на окружающую среду.

Технологии нанесения цветного изображения на поверхность металлов

Анодирование, тепловой и термохимический способ

Преимущества технологий:

1. высокая производительность при больших размерах поверхности или количестве деталей (тиражах);
2. высокая долговечность покрытия;

Недостатки технологий:

1. низкое разрешение изображения;
2. необходимость доподготовки;
3. ограниченная палитра цветов в связи с ограниченным количеством интерференционных оттенков на определенном металле;
4. невозможность нанесения более одного цвета за один цикл;
5. обязательное изготовление трафаретов;
6. отрицательное воздействие на окружающую среду (в случаях химического окисления).
7. контактное воздействие на материал

Технология ЦЛМ

Преимущества технологий:

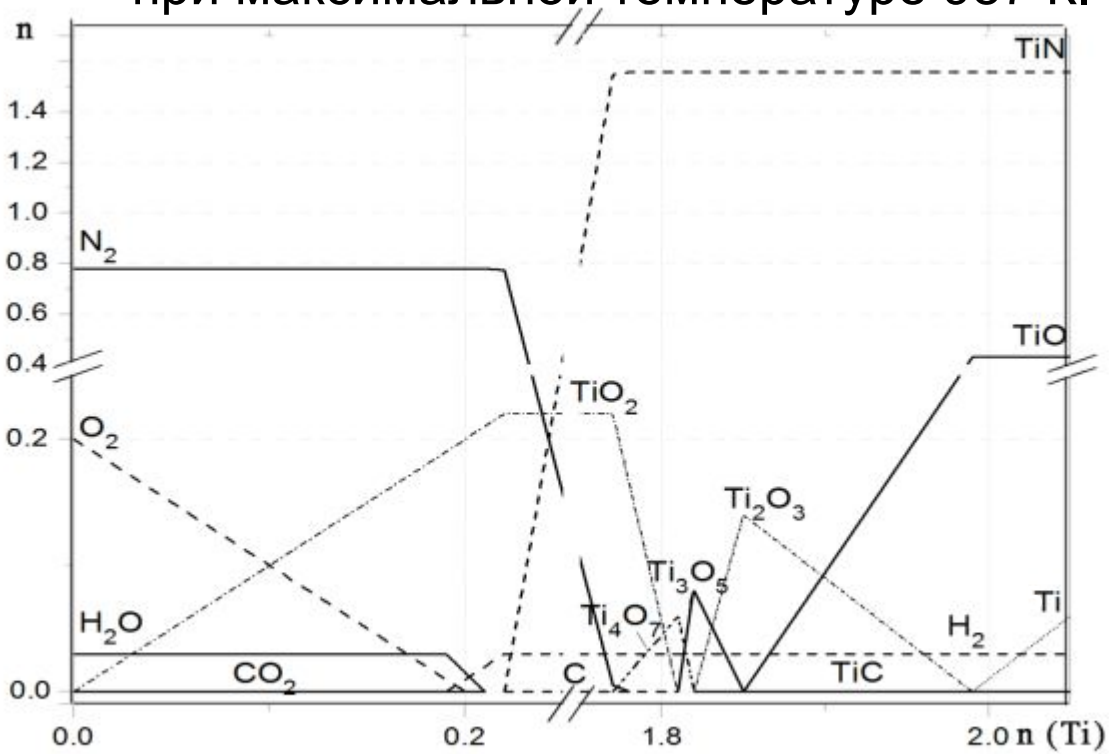
1. высокое разрешение изображения;
2. высокая производительность при большом количестве деталей (тиражах);
3. высокая долговечность покрытия;
4. не требует доподготовки;
5. бесконтактное воздействие на материал;
6. экологичность.

Недостатки технологий:

1. ограниченная палитра цветов в связи с ограниченным количеством интерференционных оттенков на определенном металле;
2. обязательное изготовление трафаретов;
3. высокая стоимость установки.

Система титан ВТ1-0– воздух. Термодинамический расчет фазово-химического состава в информационно-вычислительной системы ASTICS[8]

$$\left\{ Ti \right. + \left\{ \begin{matrix} N_2 \\ O_2 \\ H_2O \\ CO \end{matrix} \right.$$

Элемент	Количество вещества
Ti	0-2,1000
O_2	0,2000
N_2	0,7800
CO_2	0,0003
H_2O	0,0300

Зависимость количества образовавшегося вещества продукта реакции от количества вещества титана, участвующего во взаимодействии при максимальной температуре 987 К.