

## Оригинальная статья / Original article

УДК 621.762

<https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-34-46>

## Влияние режимов лазерной обработки на цвета побежалости стали 04X18H10

С.А. Чевычелов<sup>1</sup>✉, Д.А. Чуйков<sup>1</sup>, М.С. Разумов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Юго-Западный государственный университет  
ул. 50 лет Октября, д. 94, г. Курск 305040, Российская Федерация

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

### Резюме

**Целью** исследования данной статьи является выявление влияния режимов лазерной обработки на цвета побежалости стали 04X18H10.

**Методы** исследования сводились к определению диапазонов для каждого из параметров с примером получаемого цвета. Влияние параметров лазерного излучения: мощности и частоты лазерного излучения, скорости движения лазерного луча, разрешения заливки маркируемого объекта – способствует получению определенного оттенка палитры цветов по стандарту RAL.

**Результатом** исследования стали данные, по которым можно с уверенностью сказать, что скорость движения лазерного луча оказывает прямое влияние на получаемый полутон цвета. При высоких значениях данного параметра цвета становятся ближе к темным полутонам, тогда как уменьшение скорости приводит к обратному эффекту, возможно, что при невысоких скоростях движения лазерного луча происходит более медленный нагрев объекта, который приводит к получению светлых полутонов, а с постепенным увеличением скорости и, соответственно, возможным повышением температуры нагрева поверхности начинают образовываться цвета темного тона. Полученные при изменении параметра разрешения заливки результаты дают четко понять, что повышение этого показателя напрямую влияет на насыщенность получаемого цвета с ее увеличением, тогда как уменьшение количества линий заливки вызывает падение насыщенности цвета маркируемого объекта.

**Заключение.** В данной работе рассмотрено влияние факторов, ответственных за получение различных оттенков цветов при лазерной маркировке металла, получена базовая палитра цветов для последующего её расширения и использования в художественных целях.

**Ключевые слова:** лазер; цвета побежалости; режимы обработки; нержавеющая сталь.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Чевычелов С.А., Чуйков Д.А., Разумов М.С. Влияние режимов лазерной обработки на цвета побежалости стали 04X18H10 // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2024. Т. 14, № 4. С. 34–46. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-34-46>

Поступила в редакцию 18.09.2024

Подписана в печать 01.11.2024

Опубликована 13.12.2024

# The effect of laser treatment modes on the colors of the steel 04H18H10

Sergey A. Chevychelov<sup>1✉</sup>, Denis A. Chuikov<sup>1</sup>, Mikhail S. Razumov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Southwest State University  
50 let Oktyabrya Str. 94, Kursk 305040, Russian Federation

✉ e-mail: tschsa@yandex.ru

## Abstract

**The purpose** of the study of this article is to identify the effect of laser treatment modes on the color of the steel 04X18H10.

**The research** methods were reduced to determining ranges for each of the parameters with an example of the desired color. The influence of laser radiation parameters: the power and frequency of laser radiation, the speed of the laser beam, the resolution of the fill of the marked object – contributes to obtaining a certain shade of the color palette according to the RAL standard.

**The result** of the study was the data obtained, according to which it is safe to say that the speed of movement of the laser beam has a direct effect on the resulting semitone color. At high values of this parameter, the colors become closer to dark halftones, whereas a decrease in speed leads to the opposite effect, it is possible that at low speeds of the laser beam, a slower heating of the object occurs, which leads to light halftones, and with a gradual increase in speed and, accordingly, a possible increase in surface heating temperature, colors begin to form a dark tone. The results obtained by changing the fill resolution parameter make it clear that an increase in this indicator directly affects the saturation of the resulting color with its increase, whereas a decrease in the number of fill lines causes a drop in the color saturation of the marked object.

**Conclusion.** In this paper, the influence of the factors responsible for obtaining various shades of colors during laser marking of metal is considered, a basic palette of colors is obtained for its subsequent expansion and use for artistic purposes.

**Keywords:** laser; speed colors; processing modes; stainless steel.

**Conflict of interest:** The authors declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Chevychelov S.A., Chuikov D.A., Razumov M.S. The effect of laser treatment modes on the colors of the steel 04H18H10. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologies*. 2024;14(4):34–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2024-14-4-34-46>

Received 18.09.2024

Accepted 01.11.2024

Published 13.12.2024

\*\*\*

## Введение

Лазерная маркировка находит все более широкое распространение. Это связано с тем, что современный производитель качественной продукции хочет обезопасить себя от подделки его товаров [1]. Таким образом, нанесение качественной маркировки собственных деталей позволяет отличить их от подделки [2]. При изготовлении некачественных деталей про-

изводитель не будет вкладывать средства в маркировку деталей. Также стоит отметить, что при лазерной маркировке не происходит механического воздействия на деталь и, следовательно, ее повреждение [3].

Получение оксидных пленок на поверхности металлов обеспечивается за счет теплового воздействия лазерным излучением [4]. Тепловое воздействие обес-

печивается за счет [5]: фокусного расстояния линзы; длины волны; мощности излучения; частоты излучения; скорости движения лазерного луча; разрешения заливки маркируемого объекта. Изменение данных параметров влияет на процесс получения различных оксидных пленок, отличающихся друг от друга [6].

Таким образом, актуальной задачей является выявление взаимосвязей между режимами лазерной обработки и цветами побежалости.

В последнее время распространение нашло лазерное художественное гравирование цветных изображений на изделиях из различных металлов и их сплавов [7]. Таким образом, применение лазеров для целей маркировки и гравировки может помочь производителю качественного товара защитить потребителя от подделки своей продукции [8]. В связи с чем *целью работы* является выявление влияния режимов лазерной обработки на цвета побежалости стали 04X18H10.

## Материалы и методы

Стоит отметить, что для различных материалов влияние режимов лазерной

обработки на цвета побежалости различно [9]. В отличие от лазерной резки [10] выбор использования данных материалов, в частности, подразумевает и возможность художественной направленности ввиду их отличительных свойств, т. к. полученный оттенок цвета будет устойчив к различного рода воздействиям, таким как влияние длительности импульса [11], термическое [12], световое или химическое влияние [13].

В различных областях применения лазеров, например, чернение поверхности [14] или окрашивание [15], происходит формирование управляемых наноструктур сверхбыстрыми лазерными импульсами для маркировки [16].

В качестве маркируемого образца применяется лист нержавеющей стали марки 04X18H10 толщиной 1 мм, химический состав которой приведен в таблице 1. Так как маркировка данной стали носит особый характер от сталей с примесями молибдена [17] или цветными сплавами на основе алюминия и меди [18], это связано с особенностями структуры материала [19].

**Таблица 1.** Химический состав нержавеющей стали 04X18H10

**Table 1.** The chemical composition of stainless steel 04H18H10

| Элемент | C    | Si  | Mn | Ni   | S    | P     | Cr    |
|---------|------|-----|----|------|------|-------|-------|
| Мас. %  | 0,04 | 0,8 | 2  | 9–11 | 0,02 | 0,035 | 17–19 |

Изучение влияния параметров излучения проводилось с помощью лазерной установки LDesigner серии F от компании АТЕКО.

Так как такие параметры, как длина волны и фокусное расстояние линзы, являются базовыми и неизменными параметрами лазерной установки, то из описанных выше факторов, оказывающих влияние на лазерную маркировку матери-

ала, будут испытываться: мощность излучения; частота излучения; скорость движения лазерного луча; разрешение заливки маркируемого объекта.

Сначала экспериментальным путем были получены следующие параметры: мощность излучения, частота излучения, скорость перемещения лазерного луча и разрешение заливки для оттенка желтого цвета. В ходе работы были получены и ре-

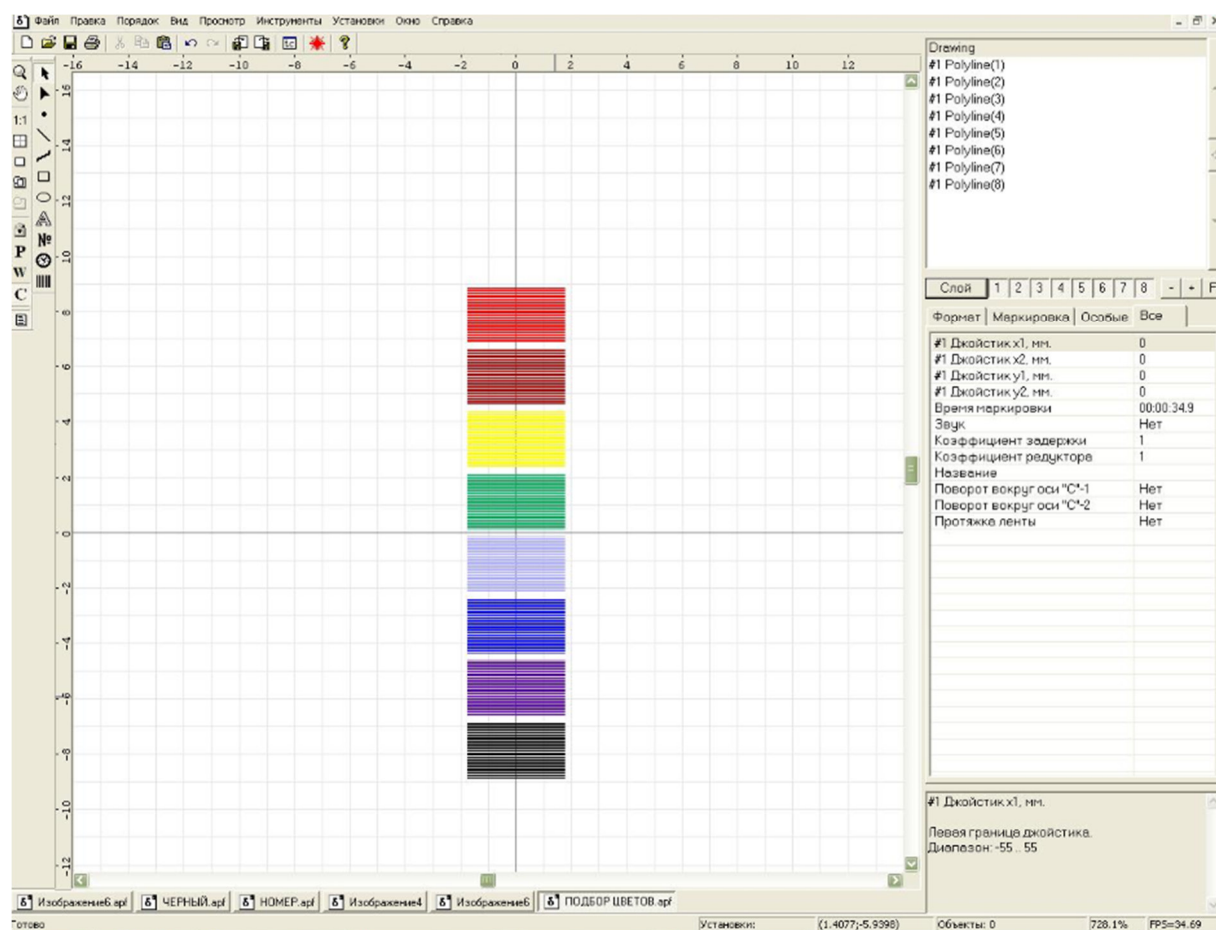
зультаты, которые определяют количественные параметры лазерного излучения для получения различных оттенков основной палитры цветов. Для объективной

картины проводилась серия опытов, кратная пяти, после чего определялся средний результат (табл. 2, рис. 1).

**Таблица 2.** Параметры лазерного излучения, соответствующие получению определенного оттенка базовой палитры цветов

**Table 2.** Laser radiation parameters corresponding to obtaining a certain shade of the basic color palette

| Получаемый цвет и его возможные оттенки | Мощность излучения $P$ , Вт | Частота излучения $F$ , Гц | Скорость движения лазерного луча $V$ , мм/с | Разрешение заливки маркируемого объекта $Q$ , линия/мм |
|-----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Красный                                 | 37                          | 70000–72000                | 65                                          | 24                                                     |
| Оранжевый                               | 35                          | 75000–77000                | 45                                          | 23                                                     |
| Желтый                                  | 44                          | 80000–82000                | 70                                          | 25                                                     |
| Зеленый                                 | 42                          | 62000–64000                | 50                                          | 24                                                     |
| Синий                                   | 45                          | 60000–62000                | 50                                          | 25                                                     |
| Фиолетовый                              | 42                          | 64000–66000                | 70                                          | 23                                                     |
| Черный                                  | 50                          | 50000–52000                | 45                                          | 20                                                     |



**Рис. 1.** Полученная базовая палитра цветов

**Fig. 1.** The resulting basic color palette

Для определения влияния одного из четырех исследуемых факторов при цветной лазерной маркировке, в первом случае – мощности излучения, проводились опыты, связанные с изменением испытуемого режима в рабочем диапазоне  $P = 35\text{--}50$  Вт, при неизменности остальных количественно усредненных параметров: частоты излучения  $F = 67000$  Гц, скорости движения лазерного луча  $V = 56$  мм/с и разрешения заливки маркируемого объекта, равного 23 линиям на миллиметр.

При среднем значении мощности диапазона  $P = 42$  Вт и константных режимах наблюдалось проявление слабого по насыщенности оттенка фиолетового цвета. Увеличение исследуемого параметра в

пределах  $P = 43\text{--}45$  Вт приводило к появлению сине-сиреневого оттенка, последующее повышение параметра мощности придавало образцу оттенок синего цвета, с его насыщением и дальнейшим переходом к оттенку зеленоватого цвета.

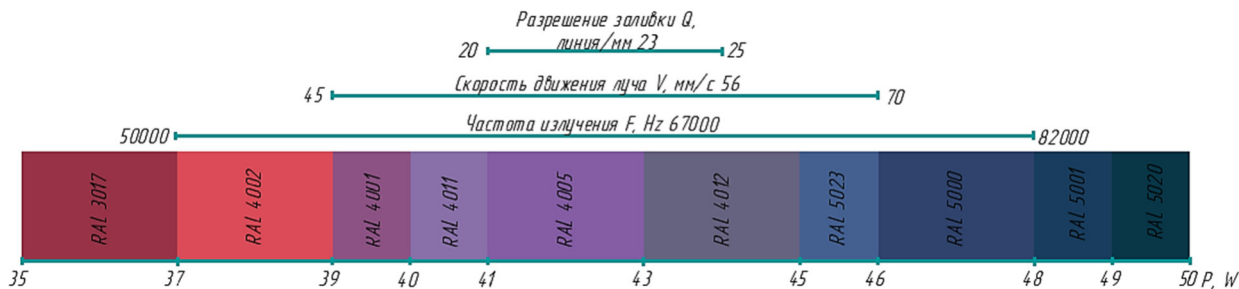
Изменение параметра мощности излучения от среднего  $P = 42$  Вт к минимальному значению исследуемого диапазона  $P = 35$  Вт приводило к появлению различных оттенков розового цвета.

Данные с полученным оттенком цвета, выявленным параметром мощности и примерным соответствием цветовому стандарту RAL (RAL – международная система соответствия цветов) приведены в таблице 3 и на рисунке 2.

**Таблица 3.** Параметры мощности лазерного излучения, соответствующие получению определенного оттенка палитры цветов по стандарту RAL

**Table 3.** Laser power parameters corresponding to obtaining a certain shade of the color palette according to the RAL standard

| Получаемый тон и его обозначение по стандарту RAL | Мощность излучения $P$ , Вт | Частота излучения $F$ , Гц | Скорость движения лазерного луча $V$ , мм/с | Разрешение заливки маркируемого объекта $Q$ , линия/мм |
|---------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Розовый<br>RAL 3017                               | 35–37                       | 67000                      | 56                                          | 23                                                     |
| Красно-фиолетовый<br>RAL 4002                     | 37–39                       |                            |                                             |                                                        |
| Красно-сиреневый<br>RAL 4001                      | 39–40                       |                            |                                             |                                                        |
| Перламутрово-фиолетовый<br>RAL 4011               | 40–41                       |                            |                                             |                                                        |
| Перламутрово-ежевичный<br>RAL 4005                | 41–43                       |                            |                                             |                                                        |
| Сине-сиреневый<br>RAL 4012                        | 43–45                       |                            |                                             |                                                        |
| Фиолетово-синий<br>RAL 5023                       | 45–46                       |                            |                                             |                                                        |
| Отдалённо-синий<br>RAL 5000                       | 46–48                       |                            |                                             |                                                        |
| Зелёно-синий<br>RAL 5001                          | 48–49                       |                            |                                             |                                                        |
| Океанская синь<br>RAL 5020                        | 49–50                       |                            |                                             |                                                        |



**Рис. 2.** График соответствия изменения параметра мощности излучения  $P$ , Вт, с получаемым оттенком цвета по стандарту RAL

**Fig. 2.** A graph of the correspondence of the change in the radiation power parameter  $P$ , W, with the resulting shade of color according to the RAL standard

### Результаты и их обсуждение

Проанализировав полученные данные, делаем вывод о том, что изменение параметра мощности излучения может напрямую влиять на спектр получаемого при маркировке изображения, т. к. при повышении данного параметра прослеживается прямая тенденция перехода цветов спектра от фиолетовых оттенков к зелёным, которые соответствуют точной обратной последовательности видимого спектрального излучения (фиолетовый – синий – голубой – зелёный).

Подобно параметру мощности излучения, испытывается степень влияния частоты лазерного излучения. Диапазон частоты излучения  $F = 50000 - 82000$  Гц, при неизменности остальных количественно усредненных параметров: мощности излучения  $P = 42$  Вт, скорости движения лазер-

ного луча  $V = 56$  мм/с и разрешения заливки маркируемого объекта, равного 23 линиям на миллиметр.

Получаемый в первом опыте оттенок фиолетового цвета проявлялся до показателя частоты  $F = 72000$  Гц, следующее повышение параметра на 2000 Гц и 4000 Гц приводило к получению красного и оранжевого цветов, дальнейшее же повышение исследуемого параметра вплоть до  $F = 72000$  Гц приводило к получению тёмно-красного цвета.

Похожая ситуация складывалась и при уменьшении параметра частоты излучения, но уже с проявлением зелено-коричневых цветов.

Данные с полученным оттенком цвета, выявленным параметром частоты и примерным соответствием цветовому стандарту RAL, приведены в таблице 4 и на рисунке 3.

**Таблица 4.** Параметры частоты лазерного излучения, соответствующие получению определенного оттенка палитры цветов по стандарту RAL

**Table 4.** The parameters of the laser radiation frequency corresponding to obtaining a certain shade of the color palette according to the RAL standard

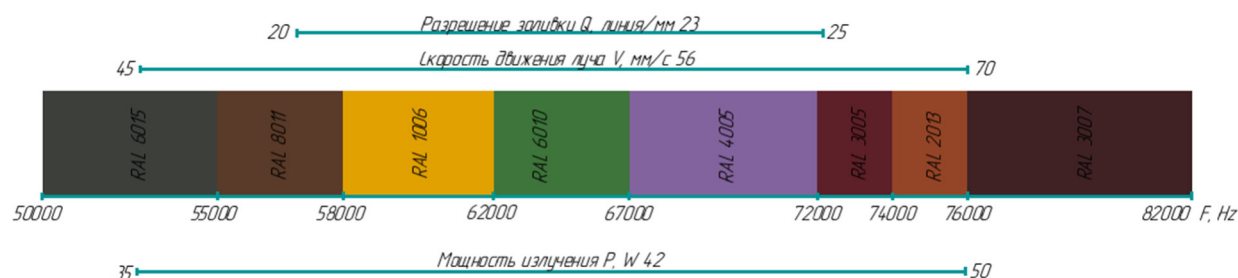
| Получаемый тон и его обозначение по стандарту RAL | Частота излучения $F$ , Гц | Мощность излучения $P$ , Вт | Скорость движения лазерного луча $V$ , мм/с | Разрешение заливки маркируемого объекта $Q$ , линия/мм |
|---------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Оливковый RAL 6015                                | 50000–55000                | 42                          | 56                                          | 23                                                     |
| Орехово-коричневый RAL 8011                       | 55000–58000                |                             |                                             |                                                        |



## Окончание табл. 4

## Ending tabl. 4

| Получаемый тон и его обозначение по стандарту RAL | Частота излучения $F$ , Гц | Мощность излучения $P$ , Вт | Скорость движения лазерного луча $V$ , мм/с | Разрешение заливки маркируемого объекта $Q$ , линия/мм |
|---------------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Кукурузно-жёлтый RAL 1006                         | 58000–62000                | 42                          | 56                                          | 23                                                     |
| Травяной зелёный RAL 6010                         | 62000–67000                |                             |                                             |                                                        |
| Перламутрово-ежевичный RAL 4005                   | 67000–72000                |                             |                                             |                                                        |
| Тёмно-красный RAL 3005                            | 72000–74000                |                             |                                             |                                                        |
| Перламутрово-оранжевый RAL 2013                   | 74000–76000                |                             |                                             |                                                        |
| Чёрно-красный RAL 3007                            | 76000–82000                |                             |                                             |                                                        |



**Рис. 3.** График соответствия изменения параметра частоты излучения  $F$ , Hz, с получаемым оттенком цвета по стандарту RAL

**Fig. 3.** A graph of the correspondence of the change in the radiation frequency parameter  $F$ , Hz, with the resulting shade of color according to the RAL standard

По полученным данным, в отличие от первого опыта, сложно сделать какие-либо выводы: частота лазерного излучения на получение различных оттенков влияния не оказывает.

При дальнейших испытаниях исследовали скорость движения лазерного луча диапазоном  $V = 45 - 70$  м/с при неизменности остальных количественно усредненных параметров: мощности излучения  $P = 42$  Вт, частоты излучения  $F = 67000$  Гц и разрешения заливки маркируемого объекта, равного 23 линиям на миллиметров.

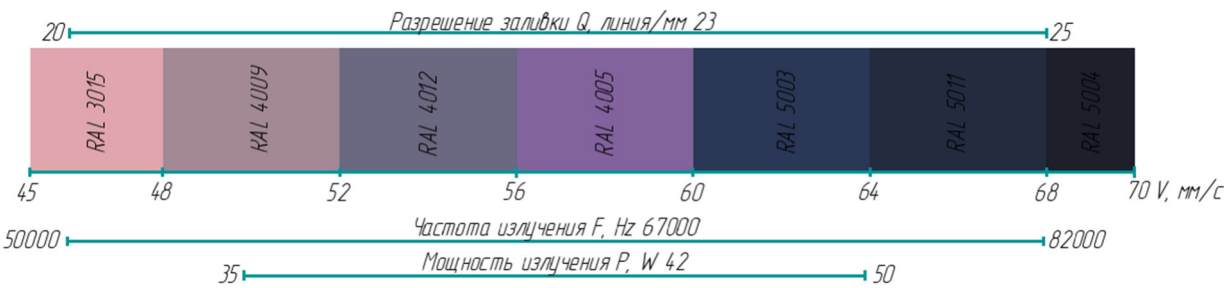
Появление перламутрово-ежевичного цвета RAL 4005, получаемого при усредненных значениях параметров маркировки, продолжается вплоть до увеличения параметра скорости луча  $V = 60$  м/с, далее приводило к получению близкого к черному цвету с синим отливом. Уменьшение же данного параметра приводило к более светлым тонам, так при  $V = 45$  м/с розовый оттенок едва различим.

Данные с полученным оттенком цвета, выявленным параметром скорости движения лазерного луча и примерным соответствием цветовому стандарту RAL, приведены в таблице 5 и на рисунке 4.

**Таблица 5.** Параметры скорости движения лазерного луча, соответствующие получению определенного оттенка палитры цветов по стандарту RAL

**Table 5.** The parameters of the speed of movement of the laser beam corresponding to obtaining a certain shade of the color palette according to the RAL standard

| Получаемый тон и его обозначение по стандарту RAL | Скорость движения лазерного луча $V$ , мм/с | Мощность излучения $P$ , Вт | Частота излучения $F$ , Гц | Разрешение заливки маркируемого объекта $Q$ , линия/мм |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------------------------------------|
| Светло-розовый RAL 3015                           | 45–48                                       | 42                          | 56                         | 23                                                     |
| Пастельно-фиолетовый RAL 4009                     | 48–52                                       |                             |                            |                                                        |
| Сине-сиреневый RAL 4012                           | 52–56                                       |                             |                            |                                                        |
| Перламутрово-ежевичный RAL 4005                   | 56–60                                       |                             |                            |                                                        |
| Сапфирово-синий RAL 5003                          | 60–64                                       |                             |                            |                                                        |
| Стально-синий RAL 5011                            | 64–68                                       |                             |                            |                                                        |
| Чёрно-синий RAL 5004                              | 68–70                                       |                             |                            |                                                        |



**Рис. 4.** График соответствия изменения параметра скорости движения лазерного луча  $V$ , мм/с, с получаемым оттенком цвета по стандарту RAL

**Fig. 4.** A graph of the correspondence of the change in the speed parameter of the laser beam  $V$ , mm/s, with the resulting shade of color according to the RAL standard

Анализируя полученные данные, можно с уверенностью сказать, что скорость движения лазерного луча оказывает прямое влияние на получаемый полутон цвета. При высоких значениях данного параметра цвета становятся ближе к темным полутонам, тогда как уменьшение скорости приводит к обратному эффекту. Возможно, что при невысоких скоростях движения лазерного луча происходит более

медленный нагрев объекта, который приводит к получению светлых полутонов, а с постепенным увеличением скорости и, соответственно, возможным повышением температуры нагрева поверхности начинают образовываться цвета темного тона.

Далее исследовали влияние параметра разрешения заливки маркируемого объекта диапазоном  $V = 20\text{--}25$  линия/мм



при неизменности остальных количественно усредненных параметров: мощности излучения  $P = 42$  Вт, частоты излучения  $F = 67000$  Гц и скорости движения лазерного луча  $V = 56$  мм/с.

Данные с полученным оттенком цвета, выявленным параметром разрешения заливки маркируемого объекта и примерным соответствием цветовому стандарту RAL приведены в таблице 6 и на рисунке 5.

**Таблица 6.** Параметры разрешения заливки маркируемого объекта, соответствующие получению определенного оттенка палитры цветов по стандарту RAL

**Table 6.** The parameters of the fill resolution of the marked object corresponding to obtaining a certain shade of the color palette according to the RAL standard

| Получаемый тон и его обозначение по стандарту RAL | Разрешение заливки маркируемого объекта $Q$ , линия/мм | Мощность излучения $P$ , Вт | Частота излучения $F$ , Гц | Скорость движения лазерного луча $V$ , мм/с |
|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------------------------------|
| Пастельно-фиолетовый RAL 4009                     | 20–21                                                  | 42                          | 67000                      | 56                                          |
| Перламутрово-фиолетовый RAL 4011                  | 21–22                                                  |                             |                            |                                             |
| Перламутрово-ежевичный RAL 4005                   | 22–23                                                  |                             |                            |                                             |
| Сигнальный фиолетовый RAL 4008                    | 23–24                                                  |                             |                            |                                             |
| Транспортный пурпурный RAL 4006                   | 24–25                                                  |                             |                            |                                             |



**Рис. 5.** График соответствия изменения параметра разрешения заливки маркируемого объекта, линия мм, с получаемым оттенком цвета по стандарту RAL

**Fig. 5.** Graph of the correspondence of the change in the fill resolution parameter of the marked object, line mm, with the resulting shade of color according to the RAL standard

Исследования показали, что перламутрово-ежевичный цвет RAL 4005 проявляется при понижении разрешения заливки на одну единицу; с последующим уменьшением параметра насыщенность

цвета становилась меньше. При увеличении количества линий заливки объект, наоборот, становился все более насыщенным с шагом в одну единицу.

Полученные при изменении параметра разрешения заливки результаты дают четко понять, что повышение этого показателя напрямую влияет на насыщенность получаемого цвета с ее увеличением, тогда как уменьшение количества линий заливки вызывает падение насыщенности цвета маркируемого объекта.

### Выводы

Рассмотрено влияние факторов, ответственных за получение различных от-

тенков цветов при лазерной маркировке металла, получена базовая палитра цветов для последующего её расширения и использования в художественных целях. Таким образом, впервые были получены взаимосвязи между режимами лазерной обработки и цветами побежалости. Полученные данные могут использоваться при маркировке изделий с целью защиты от подделок. Годовой экономический эффект при этом может составлять от 10 до 30% от всей выпускаемой продукции.

### Список литературы

1. Казакевич В.С., Яреско С.И. Тенденции развития рынка лазерных технологий для решения задач лазерной обработки материалов. Часть 1. Мировой лазерный рынок // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16, № 4. С. 266–275.
2. Марков В.В., Сметанников А.В., Кисеев П.И. Анализ причин технологических погрешностей прецизионной лазерной маркировки изделий // Прогрессивные технологии и процессы: сборник научных статей Международной молодежной научно-практической конференции: в 2-х т. Т. 2. Курск: Университетская книга, 2014. С. 34–36.
3. Фомин А.В., Глущенко А.И., Полещенко Д.А. Применение лазерных маркеров для решения задачи нанесения дополнительной маркировки на стальную заготовку // Металлург. 2020. № 1. С. 46–50.
4. Лазерно- и магнетронно-модифицированные инжектирующие поверхности электродов для ЭГД-преобразователей / А.Е. Кузько, А.И. Жакин, А.П. Кузьменко, А.В. Кузько, А.А. Прибылов, В.В. Юшин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2022. Т. 12, № 3. С. 147–168.
5. Влияние режимов лазерной обработки на изменение структуры и механических свойств поверхностного слоя деталей из стали марки 30ХГСА / И.В. Минаев, С.Н. Кутепов, Д.С. Клементьев, Е.В. Агеев // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2023. Т. 13, № 1. С. 73–86. <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-73-86>.
6. Антонов Д.Н., Бурцев А.А. Окрашивание поверхности металлов под действием импульсного лазерного излучения // Журнал технической физики. 2014. Т. 84, № 10. С. 83–86.
7. Кадыкова Т.А., Павлов Ю.А. Лазерное художественное гравирование цветных изображений на изделиях из различных металлов и их сплавов // Наука и образование в области технической эстетики, дизайна и технологии художественной обработки материалов: материалы X Международной научно-практической конференции вузов России. СПб.: С.-Петербург. гос. ун-т промышленных технологий и дизайна, 2018. С. 140–146.
8. Снимщиков И.А., Нурбек Сыдык уулу, Кутанов А.А. Применение диодных лазеров для целей маркировки и гравировки // Физика. 2022. № 1. С. 5–9. <https://doi.org/10.26104/IVK.2023.45.557>.
9. Учаев П.Н., Райник М.В. К вопросу изготовления цилиндрических зубчатых колес лазером // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2013. № 1. С. 66–70.

10. Способ лазерной гравировки металла или сплава: пат. 2479396 Рос. Федерации, МПК В23К 26/38, В41М5/24 / Горный С.Г., Патров М.И., Юдин К.В., Валиулин А.Г., Попков С.Е., Соколов Д.В. [и др.]. № 2011141367/02; заявл. 12.10.2011; опубл. 20.04.2013.
11. Metal deep engraving with high average power femtosecond lasers / M. Faucon, G. Mincuzzi, F. Morin, C. Hönninger, E. Mottay, R. Kling // Laser-based Micro- and Nanoprocessing IX: proceedings of SPIE. 2015. Vol. 9531. <https://doi.org/10.1117/12.2078915> 9351
12. Модификация размеров и фазового состава наночастиц TiO<sub>2</sub> при высокотемпературном лазерном воздействии / М.А. Пугачевский, А.П. Кузьменко, А.А. Гуламов, А.С. Сизов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2018. Т. 8, № 4 (29). С. 143–150.
13. Лазерная установка для микроструктурирования поверхности металла с использованием волоконного лазера / О.С. Васильев, В.П. Вейко, С.Г. Горный, Ю.С. Рузанкина // Оптический журнал. 2015. Т. 82, № 12. С. 70–77.
14. Surface blackening by laser texturing with high repetition rate femtosecond laser up to 1MHz / M. Faucon, A. Laffitte, J. Lopez, R. Kling // Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial Applications XIV. Proceedings SPIE. 2014. Vol. 8972. <https://doi.org/10.1117/12.2039469>
15. Пряхин Е.И., Трошина Е.Ю. Изучение технологических и эксплуатационных особенностей высокотемпературостойких композитных пленок для лазерной маркировки деталей из черных сплавов // Черные металлы. 2023. № 4. С. 74–80.
16. Пряхин Е.И., Дранова А.Ю. Особенности формирования модульной структуры двумерных кодов высокой плотности при прямой лазерной маркировке на металле // Дизайн. Материалы. Технология. 2024. № 2 (74). С. 184–189.
17. Технология лазерного микролегирования углеродистых сталей для упрочнения деталей сельскохозяйственных машин / А.Г. Пастухов, О.А. Шарая, А.Г. Минасян, Н.В. Водолазская // Инновации в АПК: проблемы и перспективы. 2016. № 2 (10). С. 34–46.
18. Лазерная модификация поверхностного слоя алюминиевой бронзы / М.С. Смаковский, С.А. Атрошенко, Е.В. Харанжевский, С.Н. Костенков, В.И. Бородулин, Г.Г. Савенков // Химическая физика и мезоскопия. 2023. Т. 25, № 4. С. 515–523.
19. Порообразование в композиционных сплавах системы WC+NiCrMoFe при лазерной наплавке / Ю.А. Артеменко, А.И. Егунов, Г.Н. Шумилин, А.А. Неранов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2012. № 2-3. С. 97–100.

## Reference

1. Kazakevich V.S., Yaresko S.I. Trends in the development of the laser technology market for solving problems of laser processing of materials. Part 1. World laser market. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk = Bulletin of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2014;16(4):266–275. (In Russ.)
2. Markov V.V., Smetannikov A.V., Kiskeyev P.I. Analysis of the causes of technological errors in precision laser marking of products In: *Progressivnye tekhnologii i protsessy: sbornik nauchnykh statei Mezhdunarodnoi molodezhnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii = Progressive technologies and processes: collection of scientific articles of the International youth scientific and practical conference*. Vol. 2. Kursk: Universitetskaya kniga; 2014. P. 34–36. (In Russ.)
3. Fomin A.V., Glushchenko A.I., Poleshchenko D.A. Application of laser markers to solve the problem of applying additional marking to a steel workpiece. *Metallurg = Metallurgist*. 2020;(1):46–50. (In Russ.)
4. Kuzko A.E., Zhakin A.I., Kuzmenko A.P., Kuzko A.V., Pribylov A.A., Yushin V.V. Laser- and magnetron-modified injector surfaces of electrodes for EHD converters. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2022;12(3):147–168. (In Russ.)

5. Minaev I.V., Kutepov S.N., Klementyev D.S., Ageev E.V. Influence of laser processing modes on changes in the structure and mechanical properties of the surface layer of parts made of 30KhGSA. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2023;13(1):73–86. (In Russ.) <https://doi.org/10.21869/2223-1528-2023-13-1-73-86>
6. Antonov D.N., Burtsev A.A. Painting of metal surfaces under the action of pulsed laser radiation. *Zhurnal tekhnicheskoi fiziki = Journal of Technical Physics*. 2014;84(10):83–86. (In Russ.)
7. Kadykova T. A., Pavlov Yu. A. Laser artistic engraving of color images on products made of various metals and their alloys. In: *Nauka i obrazovanie v oblasti tekhnicheskoi estetiki, dizaina i tekhnologii khudozhestvennoi obrabotki materialov: materialy X Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii vu-zov Rossii = Science and education in the field of technical aesthetics, design and technology of artistic processing of materials: proceedings of the X International scientific and practical conference of universities of Russia*. St.-Petersburg: St. Peterb. gos. un-t Promyshlennosti i dizaina; 2018. P. 140–146. (In Russ.)
8. Snimshechikov I.A., Nurbek Sydyk uulu, Kutanov A.A. Application of diode lasers for marking and engraving purposes. *Fizika = Journal of Physics*. 2022;(1):5–9. (In Russ.) <https://doi.org/10.26104/IVK.2023.45.557>
9. Uchaev P.N., Rainik M.V. On the issue of manufacturing cylindrical gears using a laser. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2013;(1):66–70. (In Russ.)
10. Gorny S.G., Patrov M.I., Yudin K.V., Valiulin A.G., Popkov S.E., Sokolov D.V., et al. Method of laser engraving of metal or alloy. Russian Federation patent 2479396. 20 April 2013. (In Russ.)
11. Faucon M., Mincuzzi G., Morin F., Hönninger C., Mottay E., Kling R. Metal deep engraving with high average power femtosecond lasers. *Laser-based Micro- and Nanoprocessing IX: Proceedings of SPIE*. 2015;9351. <https://doi.org/10.1117/12.2078915>
12. Pugachevsky M.A., Kuzmenko A.P., Gulamov A.A., Sizov A.S. Modification of the sizes and phase composition of TiO<sub>2</sub> nanoparticles under high-temperature laser irradiation. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2018;8(4):143–150. (In Russ.)
13. Vasiliev O.S., Veiko V.P., Gorny S.G., Ruzankina Yu.S. Laser system for microstructuring of a metal surface using a fiber laser. *Opticheskii zhurnal = Optical journal*. 2015;82(12):70–77. (In Russ.)
14. Faucon M., Laffitte A., Lopez J., Kling R. Surface blackening by laser texturing with high repetition rate femtosecond laser up to 1 MHz. In: *Frontiers in Ultrafast Optics: Biomedical, Scientific, and Industrial*. Proceedings of SPIE. 2014;8972. <https://doi.org/10.1117/12.2039469>
15. Pryakhin E.I., Troshina E.Yu. Study of technological and operational features of high-temperature-resistant composite films for laser marking of parts made of ferrous alloys. *Opticheskii zhurnal = Ferrous Metals*. 2023;(4):74–80. (In Russ.)
16. Pryakhin E.I., Dranov A.Yu. Features of the formation of a modular structure of high-density two-dimensional codes for direct laser marking on metal. *Dizain. Materialy. Tekhnologiya = Design. Materials. Technology*. 2024;(2):184–189. (In Russ.)
17. Pastukhov A.G., Sharaya O.A., Minasyan A.G., Vodolazskaya N.V. Technology of laser microalloying of carbon steels for strengthening parts of agricultural machinery. *Innovatsii v APK: problemy i perspektivy = Innovations in the agro-industrial complex: problems and prospects*. 2016;(2):34–46. (In Russ.)
18. Smakovsky M.S., Atroshenko S.A., Kharanzhevsky E.V., Kostenkov S.N., Borodulin V.I., Savenkov G.G. Laser modification of the surface layer of aluminum bronze. *Khimicheskaya fizika i mezoskopiya = Chemical physics and mesoscopy*. 2023;25(4):515–523. (In Russ.)

19. Artemenko Yu.A., Egunov A.I., Shumilin G.N., Neranov A.A. Pore formation in composite alloys of the WC+NiCrMoFe system during laser cladding. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii* = *Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technology*. 2012;(2–3):97–100. (In Russ.)

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Чевычелов Сергей Александрович**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: tschsa@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-8958-2191, Scopus Author ID: 6504281260, Author ID: 471229, SPIN-код: 9400-5265

**Sergey A. Chevychelov**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: tschsa@yandex.ru, ORCID: 0009-0006-8958-2191, Scopus Author ID: 6504281260, Author ID: 471229, SPIN-код: 9400-5265

**Чуйков Денис Алексеевич**, студент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: denchuykov46@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5095-8266, Author ID: 1242256, SPIN-код: 1137-8857

**Denis A. Chuikov**, Student of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: denchuykov46@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5095-8266, Author ID: 1242256, SPIN-код: 1137-8857

**Разумов Михаил Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Российская Федерация, e-mail: mika\_1984@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2015-3322, Researcher ID: N-3272-2016, Scopus Author ID: 54879716500, Author ID: 659383, SPIN-код: 4551-8476

**Mikhail S. Razumov**, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technologies and Equipment, Southwest State University, Kursk, Russian Federation, e-mail: mika\_1984@mail.ru, ORCID: 0000-0003-2015-3322, Researcher ID: N-3272-2016, Scopus Author ID: 54879716500, Author ID: 659383, SPIN-код: 4551-8476