

Научная статья

УДК 739.52; 672; 673.1

EDN DEOBMK

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-78-83>

Денис Михайлович Цветков¹

Сергей Ильич Галанин²

Сергей Александрович Шорохов³

^{1,2,3} Костромской государственный университет, г. Кострома, Россия

¹denis.tsvetkov@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1223-2596>

²sgalanin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5425-348X>

³s.shorokhov@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9409-9432>

ЛАЗЕРНОЕ ДЕКОРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СТАЛИ AISI 304

Аннотация. Исследовано влияние параметров лазерной маркировки на декоративные характеристики поверхности стали AISI 304. Изучались изменения шероховатости (R_a , R_z) и локального цвета (ЛЦ) (усредненное RGB значение) в зависимости от мощности лазерного излучения, скорости сканирования и разрешения (линейной плотности импульсов). Использовались два режима разрешения: 508 и 1016 dpi, при фиксированной частоте генерации лазерного луча 20 кГц. Полученные данные показывают выраженную зависимость декоративных характеристик поверхности от параметров обработки. На основании экспериментальных результатов даны рекомендации по параметрам лазерного излучения для формирования на поверхности стали рисунков необходимых цветовых параметров.

Ключевые слова: дизайн поверхности, лазерное декорирование поверхности, шероховатость поверхности, цветовые параметры поверхности, локальный цвет, изменение параметров излучения, сталь AISI 304

Для цитирования: Цветков Д. М., Галанин С. И., Шорохов С. А. Лазерное декорирование поверхности стали AISI 304 // Технологии и качество. 2025. № 4(70). С. 78–83. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-78-83>.

Original article

Denis M. Tsvetkov¹

Sergey I. Galanin²

Sergey A. Shorokhov³

^{1,2,3} Kostroma State University, Kostroma, Russia

LASER DECORATION OF AISI 304 STEEL SURFACE

Abstract. The influence of laser marking parameters on the decorative characteristics of AISI 304 steel surface was investigated. Changes in roughness (R_a , R_z) and local colour (LC) (averaged RGB value) were studied as a function of laser radiation power, scanning speed, and resolution (linear pulse density). Two resolution modes were used: 508 and 1016 dpi, with a fixed laser beam generation frequency of 20 kHz. The obtained data show a pronounced dependence of surface decorative characteristics on processing parameters. Based on experimental results, recommendations are given for laser radiation parameters for forming patterns with desired colour parameters on the steel surface.

Keywords: surface design, laser surface decoration, surface roughness, surface colour parameters, local colour, radiation parameter variation, AISI 304 steel

For citation: Tsvetkov D. M., Galanin S. I., Shorokhov S. A. Laser decoration of AISI 304 steel surface. Technologies & Quality. 2025. No 4(70). P. 78–83. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2025-4-70-78-83>.

В последние десятилетия развитие лазерных технологий кардинально изменило подходы к обработке материалов в самых различных от-

раслях – от машиностроения до медицины [1]. Также лазер все активнее внедряется в сферу декоративно-прикладного и ювелирного искусства [2, 3]. Это обусловлено уникальными характеристиками лазерной обработки, такими как

© Цветков Д. М., Галанин С. И., Шорохов С. А., 2025

высокая точность, контролируемая глубина воздействия, отсутствие физического контакта с обрабатываемой поверхностью и возможность работы с широким спектром материалов – от металлов, драгоценных камней и дерева до кожи, пластмассы и композитов. Благодаря этим качествам лазерная обработка позволяет не только тиражировать изделия, но и создавать эксклюзивные объекты, точно соответствующие художественному замыслу [4].

В условиях стремительного развития креативных индустрий возникает повышенный спрос на технологии, способные объединить индивидуальность дизайна и технологическую воспроизводимость. Лазерные системы стано-

вятся не просто инструментом обработки, но средством художественного выражения. С помощью лазера дизайнеры создают высокодетализированные орнаменты, реализуют сложные текстурные эффекты, формируют уникальные визуальные акценты и добиваются контрастных цветовых решений (рис. 1) [5, 6].

Особенно актуальным становится применение лазерной технологии в малых сериях, в персонализированных и кастомизированных проектах, где традиционные методы, такие как механическое фрезерование или химическое и электрохимическое гравирование, оказываются менее гибкими и более затратными.



Рис. 1. Примеры лазерной декоративной гравировки на поверхности различных материалов (из открытых источников)

Научные исследования особенностей лазерной обработки применительно к обработке художественных объектов позволяют перейти от эмпирического подхода к рациональному выбору параметров лазерного воздействия, учитывая как физические свойства материала, так и желаемый эстетический эффект [1, 2, 4]. Понимание взаимосвязей между параметрами лазера (мощность, скорость перемещения светового луча, частота генерации импульсов, разрешение) и визуальными характеристиками обработанной поверхности открывает возможности для предсказуемого конструирования текстур, графики и объемных эффектов. В настоящей работе рассматривается применение лазерной обработки в контексте создания дизайнерских изделий с акцентом на анализ технологических аспектов и художественных возможностей метода. Экспериментальная часть

направлена на выявление оптимальных условий для достижения заданных визуальных эффектов на различных материалах. В частности, исследование проводилось на образцах из аустенитной нержавеющей стали марки AISI 304, которая широко применяется в декоративных и функциональных изделиях, благодаря сочетанию коррозионной стойкости, пластичности и хорошей восприимчивости к лазерной маркировке.

Методика эксперимента. Материал: нержавеющая сталь AISI 304, полированная.

Лазер: импульсный волоконный лазер (длина волны 1064 нм), частота 20 кГц. Изменяемые параметры:

- мощность лазера: 10, 30, 50, 70, 90 % (от номинальной 50 Вт);
- скорость сканирования: 50, 100, 300, 600, 900 мм/с;

– разрешение: 508 и 1016 dpi (соответственно, 20 и 40 линий/мм).

Микроскоп: Микроскоп металлографический Метам ЛВ-32 (Объектив 5×, Окуляры 10×/18).

Измерения:

- шероховатость (R_a , R_z): контактный профилометр Marsurf PS1;
- цвет: цифровая макросъемка с последующим определением локального цвета (среднего значения RGB) для зоны маркировки. Для нахождения ЛЦ выбиралось пять точек в зоне маркировки. Для них определялись значения RGB, максимальное и минимальное значение отбрасывалось, остальные усреднялись.

Влияние скорости перемещения луча и мощности излучения на шероховатость обработанной поверхности

Измерения шероховатости показали выраженную зависимость параметров R_a и R_z от скорости перемещения луча и мощности излучения. Для обоих уровней разрешения наблюдается общая тенденция: с увеличением скорости сканирования значения R_a и R_z снижаются. Максимальные значения шероховатости достигаются при низких скоростях и высоких мощностях. Так, при разрешении 508 dpi и мощности 90 % R_a возрастает до 10 мкм при скорости 50 мм/с, а при разрешении 1016 dpi – до 16 мкм при тех же условиях.

По мере увеличения скорости сканирования до 900 мм/с R_a уменьшается до 0,2...1,5 мкм, что соответствует лишь незначительной модификации поверхности (рис. 2). Данный эффект объясняется снижением времени взаимодействия лазерного импульса с поверхностью: чем выше скорость перемещения луча, тем меньше тепловой энергии успевает передаться материалу в единице площади, и глубина модификации уменьшается.

Сравнение режимов разрешения показывает, что при одинаковых параметрах мощности и скорости шероховатость оказывается выше при 1016 dpi. Это связано с большей плотностью импульсов на единицу площади, что приводит к усилению локального нагрева и, как следствие, к более интенсивному плавлению и микрорельефообразованию. Кроме того, зависимости при высоком разрешении проявляются более отчетливо, что указывает на повышенную чувствительность структуры поверхности к изменению параметров лазерного воздействия.

Таким образом, скорость и разрешение оказывают взаимосвязанный эффект на формирование микрорельефа: повышение разрешения

усиливает тепловое воздействие, а рост скорости, напротив, его ослабляет. Оптимальное сочетание этих параметров позволяет управлять шероховатостью поверхности в широком диапазоне – от практически полированной до глубоко модифицированной с выраженной структурой.

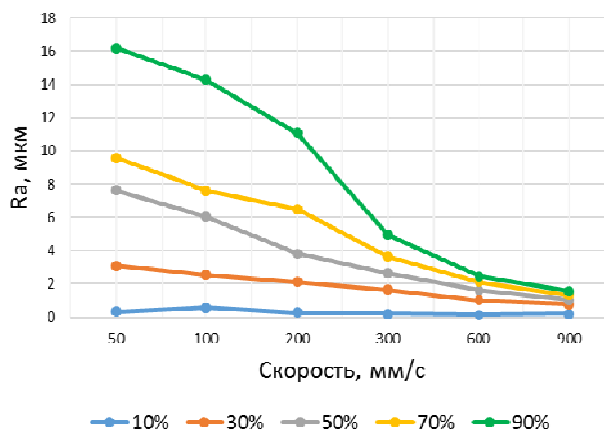


Рис. 2. Зависимость шероховатости R_a от скорости перемещения луча при различных мощностях излучения и при разрешении 1016 dpi (40 лин/мм)*

Влияние скорости перемещения луча и мощности излучения на локальный цвет

Изменение цветовых характеристик поверхности при лазерной обработке связано с термической модификацией поверхностного слоя. В проведенных экспериментах регистрировалось изменение локального цвета (ЛЦ) в диапазоне значений RGB от 50 до 200, соответствующее переходу от темно-коричневых оттенков к более светлым (рис. 3).



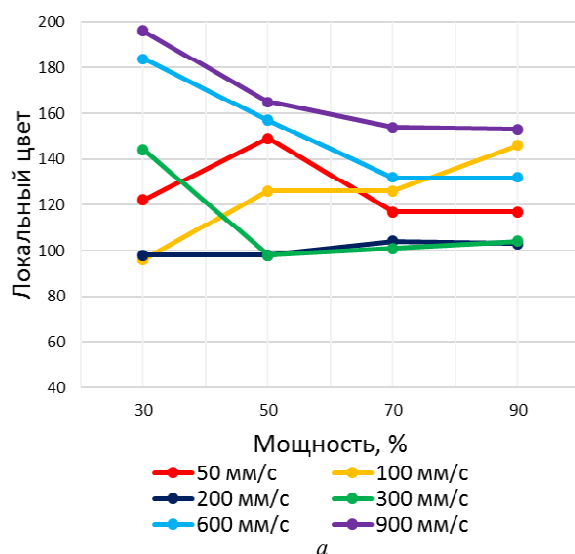
Рис. 3. Цвет поверхности после маркировки

При низкой мощности излучения (10 % от номинала) значения ЛЦ остаются близкими к исходным ($RGB \approx 157$) независимо от скорости перемещения луча, что указывает на минимальное тепловое воздействие лазера. С увеличением мощности наблюдаются более выраженные изменения: на низких скоростях (50...200 мм/с) происходит заметное потемнение

* Полноцветная версия представлена на сайте. URL: <https://tik.kosgos.ru>.

поверхности, в то время как при высоких скоростях (300...900 мм/с) отмечается обратная тенденция – поверхность светлеет.

При разрешении 508 dpi и мощности 30 % зафиксированы ярко выраженные экстремумы ЛЦ, тогда как при разрешении 1016 dpi зависимость становится более плавной. Минимальные значения ЛЦ достигаются при мощности 90 % и скорости 300 мм/с, тогда как максимальные – при мощности 30 % и скорости 900 мм/с. Следует отметить, что для обоих режимов разрешения экстремальные значения фиксировались при совпадающих параметрах обработки (рис. 4).



Анализ графических зависимостей показал наличие характерной V-образной зависимости ЛЦ от скорости перемещения луча при постоянной мощности излучения (рис. 5). Для каждой мощности наблюдается выраженный локальный минимум, что объясняется особенностями теплового воздействия. На средних скоростях (200...300 мм/с) поверхность успевает прогреться до уровня, достаточного для интенсивного изменения цвета, в результате чего значение ЛЦ снижается. При дальнейшем увеличении скорости время взаимодействия сокращается, тепловой эффект уменьшается, и поверхность приобретает более светлый оттенок.

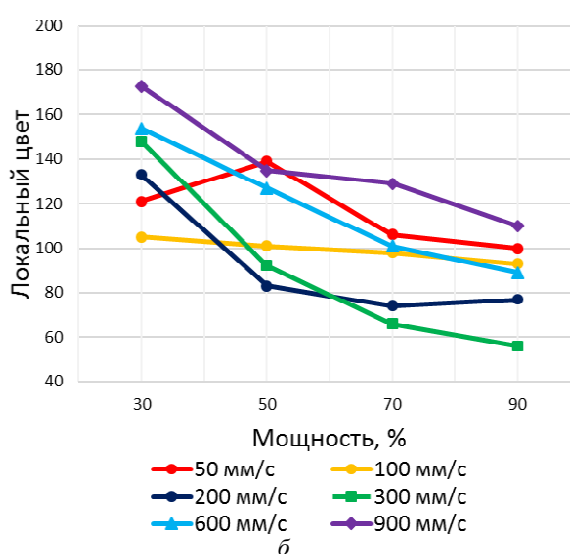


Рис. 4. Значение ЛЦ в зависимости от мощности лазерного излучения при различных скоростях перемещения луча и разрешении 508 dpi (а) и 1016 dpi (б)

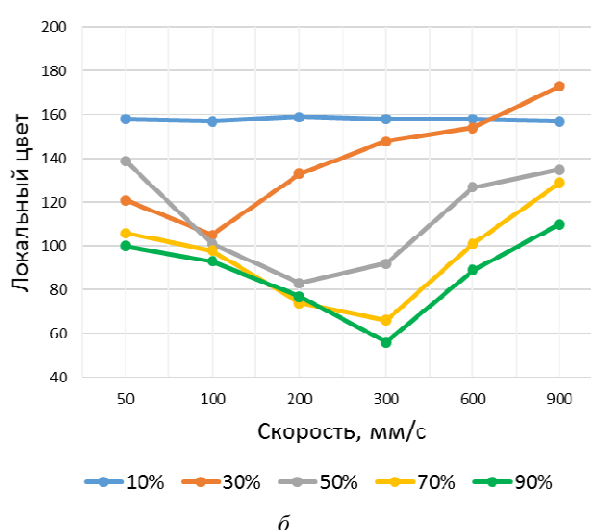
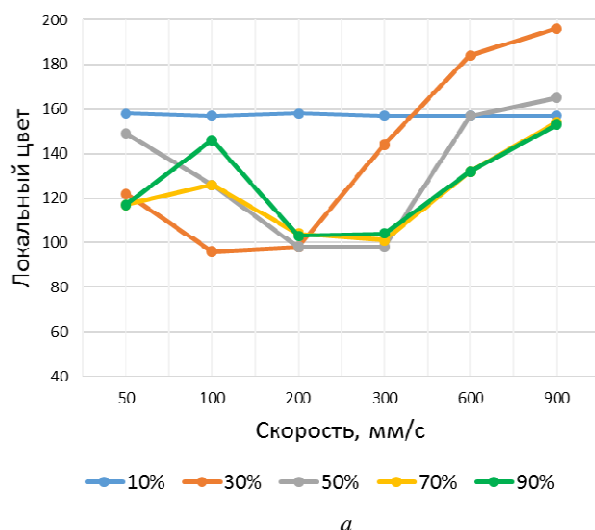


Рис. 5. Значение ЛЦ в зависимости от скорости перемещения луча при различных мощностях излучения и разрешении 508 dpi (а) и 1016 dpi (б)

Визуально это проявляется в изменении контрастности линий (рис. 6): при очень низких и при высоких скоростях сканирования линии

хорошо различимы и контрастны, тогда как при средних скоростях их контуры сглаживаются, и отдельные следы воздействия практически

сливаются. Таким образом, наблюдаемая V-образная зависимость локального цвета на графиках находит прямое подтверждение в морфологии обработанной поверхности.

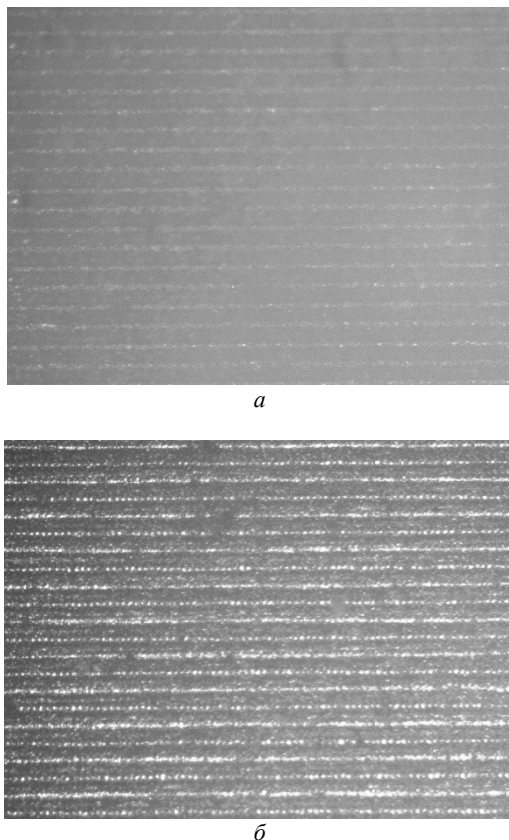


Рис. 6. Образцы при 50-кратном увеличении при разрешении 508 dpi мощности 30 % от номинала и скорости 200 мм/с (а) и 900 мм/с (б)

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование показало, что параметры лазерной маркировки существенно влияют как на физические характеристики поверхности стали AISI 304, так и на ее визуальное восприятие.

1. Изменение скорости сканирования приводит к V-образной зависимости цветовых характеристик: при средних скоростях (200...300 мм/с) формируется равномерный темный оттенок, благодаря которому рисунок воспринимается максимально четко и цельно человеческим зрением. При низких и высоких скоростях появляются вариации яркости и оттенков, которые могут использоваться для создания визуальной динамики.

2. Шероховатость поверхности определяет характер отражения света и, следовательно, особенности восприятия фактуры: от мягкой матовой до более контрастной и графической. Это дает возможность варьировать не только цветовые, но и текстурные эффекты.

3. Управление комбинацией технологических параметров (скорость, мощность и разрешение сканирования) позволяет получать широкий спектр решений для прикладного и декоративного применения.

Таким образом, лазерная маркировка стали AISI 304 может рассматриваться не только как технологический процесс, но и как способ целенаправленного формирования визуальных акцентов и текстур, что делает ее перспективной для промышленного дизайна, оформления интерьера и создания декоративных изделий.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Investigation of the Effect of Laser Power, Speed and Frequency on Surface Roughness and Color Marking on AISI 304 / G. Tutins, I. Adijans, E. Yankov, A. Bikovs // Environment. Technology. Resources. 2024. Vol. 3. P. 460–464.
2. Кончус Д. А., Воробьев С. А., Гусев А. В. Исследование влияния параметров лазерной обработки на формирование структуры поверхности стали // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1 «Естественные и технические науки». 2021. № 2. С. 34–41.
3. Цветков Д. М. Материалы, используемые для изготовления фурнитуры с применением лазерной обработки // Научные исследования и разработки в области дизайна и технологий : материалы Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Кострома : Костром. гос. ун-т, 2025. 1 CD-ROM. С. 387–391.
4. Statistical Modeling and Characterization of Laser Marking on AISI 301LN Stainless Steel Using Short-Pulsed Fiber Laser / M. Rezayat, M. Karamimoghadam, N. Contuzzi, G. Casalino, A. Mateo // Metals. 2025. Vol. 15, no 5. P. 519.
5. Галанин С. И., Колупаев К. Н., Лебедева Т. В. Цветовой дизайн ювелирно-художественных изделий: проблемы и решения // Технологии и качество. 2023. № 2(60). С. 36–42.
6. Особенности дизайна художественных изделий, изготовленных методом лазерной резки / И. А. Груздева, А. О. Овчинникова, Е. О. Боровая, А. А. Барышева // Технологии и качество. 2024. № 1(63). С. 58–63.

REFERENCES

1. Tutins G., Adijans I., Yankov E., Bikovs A. Investigation of the Effect of Laser Power, Speed and Frequency on Surface Roughness and Color Marking on AISI 304. *Environment. Technology. Resources*. 2024;3:460–464.
2. Konchus D. A., Vorobyov S. A., Gusev A. V. Research of the Influence of Laser Processing Parameters on the Formation of the Surface Structure of Steel. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizajna. Seriya 1. Estestvennye i texnicheskie nauki* [Bulletin of St. Petersburg state university of technology and design. Series 1. Natural and technical sciences]. 2021;2:34–41. (In Russ.)
3. Tsvetkov D. M. Materials Used for the Manufacture of Hardware with the Use of Laser Processing. *Nauchnye issledovaniya i razrabotki v oblasti dizajna i tekhnologij* [Scientific research and development in the field of design and technology]. Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation. Kostroma, Kostroma St. Univ. Publ., 2025. 1 CD-ROM. P. 387–391. (In Russ.)
4. Rezayat M., Karamimoghadam M., Contuzzi N., Casalino G., Mateo A. Statistical Modeling and Characterization of Laser Marking on AISI 301LN Stainless Steel Using Short-Pulsed Fiber Laser. *Metals*. 2025;15,5:519.
5. Galanin S. I., Kolupaev K. N., Lebedeva T. V. Color design of jewelry and art products: problems and solutions. *Tekhnologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2023;2(60):36–42. (In Russ.)
6. Gruzdeva I. A., Ovchinnikova A. O., Borovaya E. O., Barysheva A. A. Design features of art products made by laser cutting method. *Tekhnologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2024;1(63):58–63. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 10.09.2025
Принята к публикации 07.11.2025

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Д. М. Цветков, старший преподаватель
С. И. Галанин, доктор технических наук, профессор
С. А. Шорохов, кандидат технических наук, доцент