

Научная статья
УДК 739.52; 672; 673.1
EDN XYUBMF

<https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-1-71-69-75>

Денис Михайлович Цветков

Костромской государственной университет, г. Кострома, Россия
denis.tsvetkov@bk.ru, <https://orcid.org/0009-0007-1223-2596>

МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ДИЗАЙНЕРСКИХ РЕШЕНИЙ

Аннотация. Представлен систематизированный обзор современных методов лазерной обработки металлов, ориентированных на решение дизайнерских задач. Рассмотрены физические основы, технологические параметры, формируемые визуально-тактильные эффекты шести ключевых методов: лазерного отжига, травления, гравировки, абляционной обработки, полировки (переплава) и темной маркировки. Особое внимание уделено созданию цветовых и фактурных решений для кастомизации продукции. На основе сравнительного анализа сформированы практические рекомендации по выбору технологии в зависимости от декоративного эффекта, типа материала и области применения. Показано, что лазерные технологии представляют собой экологически чистый и высокоэффективный инструмент для реализации художественных решений в промышленном дизайне, ювелирном искусстве и производстве премиальной фурнитуры.

Ключевые слова: лазерная обработка, дизайн поверхности, цветовая маркировка, лазерный отжиг, лазерная гравировка, кастомизация, декоративные покрытия, металлы

Для цитирования: Цветков Д. М. Методы лазерной обработки поверхности металлов для дизайнерских решений // Технологии и качество. 2026. № 1(71). С. 69–75. <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-1-71-69-75>.

Original article

Denis M. Tsvetkov

Kostroma State University, Kostroma, Russia

METHODS OF LASER SURFACE PROCESSING OF METALS FOR DESIGN SOLUTIONS

Abstract. The article presents a systematic review of modern methods of laser processing of metals for design applications. The physical principles, technological parameters, and resulting visual-tactile effects of six key methods are considered – laser annealing, etching, engraving, ablative processing, polishing (remelting), and dark marking. Particular attention is paid to the creation of colour and textural solutions for product customisation. Based on a comparative analysis, practical recommendations are provided for selecting a technology depending on the decorative effect, material type, and application area. Laser technologies are shown to be an environmentally friendly and highly effective tool for implementing artistic solutions in industrial design, jewellery art, and premium hardware manufacturing.

Keywords: laser processing, surface design, colour marking, laser annealing, laser engraving, customisation, decorative coatings, metals

For citation: Tsvetkov D. M. Methods of laser surface processing of metals for design solutions. Technologies & Quality. 2026. No 1(71). P. 69–75. (In Russ.) <https://doi.org/10.34216/2587-6147-2026-1-71-69-75>.

Современное развитие лазерных технологий принципиально изменило подходы к обработке металлических поверхностей [1]. Экспериментальные исследования подтверждают выраженную зависимость декоративных характеристик поверхности от параметров обработки,

таких как мощность излучения, скорость сканирования луча и разрешение [2]. Лазерное оборудование применяется не только для резки и сварки, но и для тонкого структурирования – микрообработки, обеспечивающей управление состоянием поверхности на уровне микронных и субмикронных структур [3].

© Цветков Д. М., 2026

Современные системы ЧПУ обеспечивают точное регулирование мощности, частоты импульсов, скорости и разрешения сканирования, создавая декоративные и художественные эффекты без применения красителей или химического травления [4, 5]. Это открывает перспективные направления использования лазеров в дизайне изделий, ювелирном искусстве, сувенирном производстве и создании премиальной фурнитуры. Особую актуальность эти технологии получают в условиях растущего спроса на кастомизацию продукции [5]. Современные потребители все чаще ориентированы на уникальные визуальные решения, отражающие индивидуальность стиль или корпоративную идентичность [4, 5].

Гибкость цифрового управления лазерным оборудованием позволяет адаптировать узоры, надписи, текстуры и цветовые решения под требования заказчика без переналадки технологического процесса, что соответствует принципам современного дизайна [5].

Существенным преимуществом является экологическая составляющая. В отличие от традиционных методов декоративной обработки

(химическая обработка, электрохимическая анодная обработка, анодные конверсионные покрытия, катодные покрытия, химическое травление), лазерное воздействие не требует применения вредных химических реагентов и не образует токсичных отходов [6]. Таким образом, лазерная микрообработка соответствует принципам устойчивого дизайна (sustainable design), отдавая приоритет чистым и энергоэффективным технологиям.

В обзоре систематизированы современные методы лазерной обработки металлов (рис. 1), применяемые для формирования визуальных и тактильных эффектов [3, 4, 6, 7]. Проанализированы физические основы процессов, технологические параметры, а также возможности и ограничения основных методов – лазерного отжига, травления, гравировки, абляционной и темной маркировки, а также лазерной полировки (переплава) как финишной операции. Приведены примеры применения технологий в дизайне изделий и рекомендации по выбору метода в зависимости от требуемого эффекта и характеристик материала.

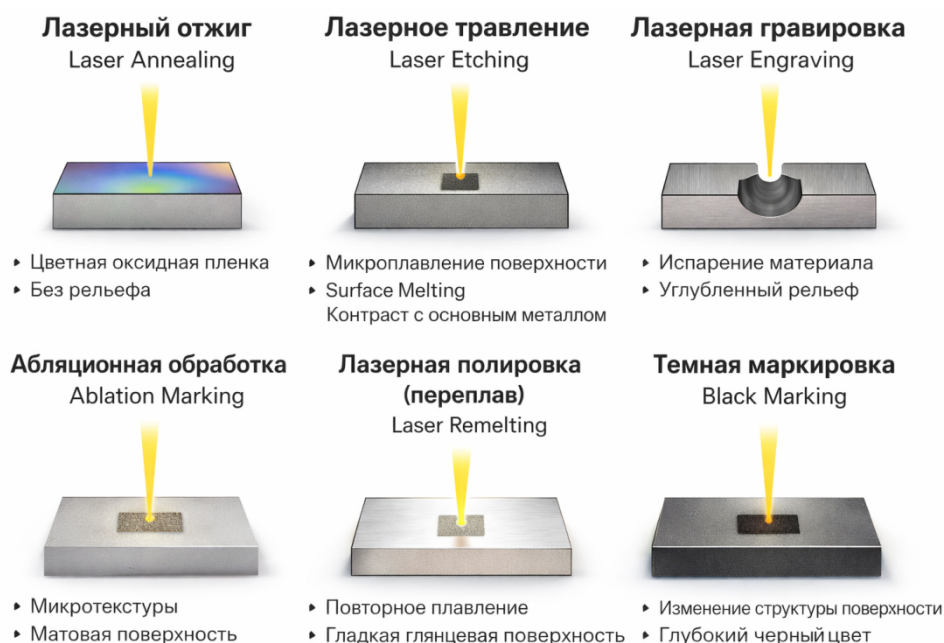


Рис. 1. Основные виды лазерной обработки и их особенности

1. Лазерный отжиг. В основе лазерного отжига лежит локальный нагрев поверхности металла без удаления материала. На поверхности формируется тонкая оксидная пленка, толщина и состав которой определяются температурой нагрева, продолжительностью воздействия и составом сплава. Визуально это проявляется цветовыми переходами – от желтых и синих до фиолетовых и черных оттенков, обу-

словленных интерференцией света в оксидной пленке (рис. 2) [4, 8].

Критически важным параметром выступает диаметр лазерного луча и распределение энергии в нем, непосредственно влияющие на геометрию и однородность цветового пятна [3]. Для получения равномерного цвета необходим стабильный тепловой режим. Обычно применяются импульсные волоконные лазеры мощно-

стью 10...30 Вт с частотой 20...100 кГц и скоростью сканирования 100...900 мм/с. При мощности 5...10 Вт получаются светлые оттенки, при 20...30 Вт – насыщенные.



Рис. 2. Лазерный отжиг

Разрешение варьируется от 20 до 1000 линий/мм. При низком разрешении (20...60 линий/мм) формируются полосатые или текстурированные зоны с интерференционным цветом, при высоком (250...1000 линий/мм) – равномерное сплошное цветовое поле. Необходимо выбирать интервал между точками воздействия, минимизирующий взаимное термическое влияние импульсов и предотвращающий смазывание цветовой картины [3]. Подобное варьирование характера окрашивания служит эффективным художественным приемом в дизайне [4].

Наиболее впечатляющие результаты достигаются на нержавеющей стали, титане и ниобии. Цветовые характеристики конечного изображения определяются параметрами оксидных пленок – их толщиной, фазовым и химическим составом, зависящими как от химического состава сплава, так и от температурно-временных режимов лазерного комплекса [9]. Сформированные методом лазерного отжига покрытия демонстрируют устойчивость к истиранию и воздействию химически нейтральных сред, что определяет их перспективность для декоративных и функциональных применений – от ювелирных украшений и бижутерии до маркировки медицинских инструментов [4, 5, 8].

2. Лазерное травление. Лазерное травление характеризуется большей интенсивностью воздействия по сравнению с отжигом, сопровождающаяся частичным испарением и микроплавлением поверхности. Это приводит к образованию зон с измененной микроструктурой и цветом, контрастирующих с основным металлом. Цветовой эффект возникает благодаря сочетанию оксидообразования, изменения шероховатости и диффузного отражения (рис. 3) [1, 3].

Метод применяется для получения устойчивых темных оттенков и полутонов без значительного изменения рельефа. В отличие от гравировки, травление сохраняет относительно гладкую поверхность и подходит для формирования тонких рисунков и надписей, требующих визуального контраста без объемного рельефа.

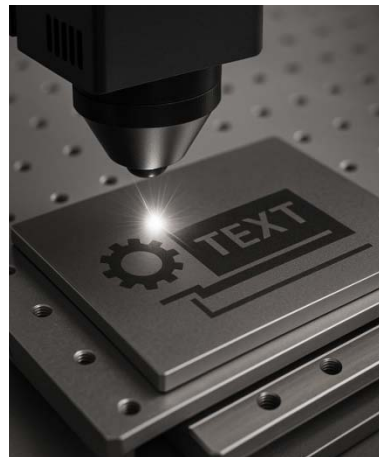


Рис. 3. Лазерное травление

Типичные параметры процесса: мощность 15...45 Вт, частота 20...100 кГц, скорость 100...800 мм/с. При этом установлено, что на средних скоростях (200...300 мм/с) формируется наиболее равномерный темный оттенок, обеспечивающий максимальную четкость рисунка [2]. Экспериментальные исследования на стали AISI 304 выявили V-образную зависимость локального цвета от скорости сканирования. На средних скоростях (200...300 мм/с) формируется наиболее равномерный темный оттенок, обеспечивающий максимальную четкость рисунка, в то время как при низких и высоких скоростях наблюдаются вариации яркости [2]. Увеличение мощности и снижение скорости усиливают контраст и потемнение оттенка. Наиболее стабильные результаты достигаются при обработке нержавеющей стали, титана и алюминиевых сплавов [1, 7].

3. Лазерная гравировка. Лазерная гравировка предполагает удаление части материала посредством плавления и испарения. Процесс сопровождается формированием рельефа различной глубины, создающим визуальный контраст благодаря теням и диффузному отражению света. Как и при маркировке, технология основана на построчном нанесении точек-пикселей на полной мощности лазера, формирующих рельефную поверхность с измененными свойствами [3]. Глубина гравировки может составлять от нескольких микрометров до десятых долей миллиметра в зависимости от мощности лазера и продолжительности воздействия [1, 5, 8].

Систематические исследования подтверждают статистически значимое влияние мощности лазера и количества проходов на шероховатость и ширину гравировки. Увеличение мощности с 30 до 60 Вт и числа проходов с 5 до 15 приводит к росту шероховатости с 13,8 до 16,8 мкм и ширины гравировки с 35 до 51 мкм [7].

Технология востребована для нанесения текстовых и графических изображений, создания декоративных орнаментов и фактур. Комбинация гравировки с другими методами, например с локальным отжигом, позволяет получать сложные эффекты, такие как цветной рельеф, значительно расширяя палитру дизайнера [4, 5].

Для высокодетализированных изображений применяются импульсные волоконные лазеры мощностью 10...30 Вт с частотой 20...200 кГц и скоростью 50...500 мм/с. Разрешение сканирования составляет 100...1000 линий/мм. Нержавеющая сталь обеспечивает четкие границы рисунка, алюминий – высокий контраст, а драгоценные металлы позволяют создавать изящные персонализированные изделия [1, 5, 8].

4. Абляционная обработка. Абляция представляет процесс удаления материала путем мгновенного испарения под воздействием импульсов высокой плотности энергии. Зона нагрева при этом минимальна, а термическое влияние на окружающие участки незначительно. Метод применяется для формирования тонких линий, микротекстур и рельефов с высокой точностью [1, 7].

Визуальный эффект абляции связан не только с рельефом, но и с изменением микроструктуры поверхности, влияющим на отражательную способность и оптические свойства металла. Такие поверхности могут приобретать матовый, шелковистый или контрастный вид в зависимости от параметров излучения [7].

5. Лазерная полировка (переплав). Лазерная полировка (лазерный переплав) – это процесс выравнивания микрорельефа поверхности за счет контролируемого оплавления тонкого поверхностного слоя под действием лазерного излучения (рис. 4). Силы поверхностного натяжения расплавленного металла приводят к сглаживанию неровностей (пиков) и заполнению впадин, что позволяет снижать шероховатость в 8...10 раз, достигая на сталях уровня $Ra = 0,1...0,2$ мкм [10]. В отличие от механической полировки, этот метод является бесконтактным, не создает механических напряжений и позволяет обрабатывать сложные рельефные поверхности, включая внутренние полости и каналы.

Процесс особенно востребован как финишная операция после аддитивного производ-

ства (3D-печати металлом), литья, механической или электроэрозионной обработки, где требуется устранить характерную слоистую или шероховатую текстуру без изменения геометрии детали. Для полировки преимущественно используются волоконные лазеры непрерывного или импульсного действия в режиме сканирования. Ключевыми параметрами являются плотность энергии, достаточная для плавления вершин микронеровностей, но недостаточная для глубокого проплавления, а также скорость сканирования, определяющая время существования расплавленной фазы [10].



Рис. 4. Лазерная полировка (переплав)

В контексте дизайнерских решений лазерная полировка является незаменимым инструментом для создания контраста между текстурами. Например, сочетание матовой гравировки или шероховатой абляции с идеально гладкими, зеркальными полированными участками создает сложные визуальные и тактильные эффекты, подчеркивающие ценность изделия. Как часть комплекса лазерных технологий, полировка расширяет возможности финишной обработки ответственных и декоративных поверхностей. Метод находит применение при создании премиальной фурнитуры, элементов интерьера, авторских украшений и сувениров, где качество поверхности напрямую влияет на восприятие.

6. Темная маркировка. Темная маркировка (black marking) – разновидность лазерной обработки, создающая устойчивый черный или темно-серый контраст без заметного рельефа. Эффект достигается использованием сверхкоротких импульсов, формирующих наноразмерные оксидные или интерференционные структуры на поверхности металла [1, 3, 7, 8].

Преимущества метода включают высокую контрастность изображения при любой ориентации освещения, химическую и механическую стойкость результата. Для уверенного визуаль-

ного или машинного считывания критически важен контраст, достигаемый правильным подбором параметров, обеспечивающих необходимую толщину и поглощательную способность оксидного слоя [3]. Темная маркировка оптимальна для нанесения серийных номеров, штрихкодов, логотипов и декоративных элементов, особенно на медицинских и ювелирных изделиях, где недопустимо изменение геометрии поверхности [5, 7, 8, 9].

7. Сравнение методов и практические рекомендации. На основе анализа физических основ, технологических параметров и визуальных эффектов проведена систематизация методов лазерной обработки. Сравнительные характеристики представлены в таблице, служащей основой для выбора технологии в соответствии с дизайнерскими задачами.

На основе сравнительного анализа сформулированы практические рекомендации по применению методов (рис. 5).

Лазерный отжиг – оптимален для цветовых эффектов без рельефа: декоративные вставки, ювелирные изделия, сувениры [4, 5].

Лазерное травление – контрастные надписи, логотипы, тонкая графика [1].

Лазерная гравировка – при создании рельефных орнаментов, персонализированных медалей или значков, элементов фурнитуры [5, 7].

Абляционная обработка – для матовых и текстурированных поверхностей, используемых в интерьерных или технических решениях [7].

Лазерная полировка (переплав) – применяется как финишная операция для получения зеркального блеска и снижения шероховатости на сложнопрофильных поверхностях, а также для создания контраста между текстурами в дизайнерских изделиях [10].

Темная маркировка – при необходимости устойчивого контраста и высокой долговечности, в том числе в премиальной и медицинской продукции [5, 9].

Т а б л и ц а

Сравнительные характеристики методов лазерной обработки

Метод	Физический механизм	Изменение рельефа	Цветовой эффект	Типичный материал	Преимущества	Ограничения
Лазерный отжиг	Локальный нагрев и окисление [4, 8]	Нет	Интерференционный (цветной) [4, 9]	Нержавеющая сталь, титан, ниобий [4]	Яркие цвета без удаления материала [4, 5]	Ограниченная стойкость при высоких температурах [4]
Лазерное травление	Микроплавление и частичное испарение [1, 3]	Незначительное	Темный, контрастный [1]	Сталь, алюминий, титан [1]	Контраст и детализация [1]	Ограниченная глубина эффекта
Лазерная гравировка	Испарение и плавление материала [1, 3, 7]	Есть (глубина до десятков мкм) [7]	Серый или металлический	Любые металлы [1, 5]	Выразительный рельеф, стойкость [5]	Нет цветных эффектов
Абляция	Испарение при высокой плотности энергии [1, 7]	Микрорельеф	Матовый или дифракционный [7]	Сталь, медь, алюминий [7]	Точность, функциональные свойства [7]	Требуется точный контроль [7]
Лазерная полировка	Контролируемый переплав поверхностного слоя [10]	Сглаживание (снижение Ra в 8...10 раз) [10]	Металлический блеск, зеркальность	Коррозионно-стойкие стали, сплавы Ti, Ni [10]	Бесконтактная обработка сложного рельефа, высокое качество поверхности [10]	Требуется точного контроля режимов (риск перегрева) [10]
Темная маркировка	Формирование наноструктур [1, 3, 7]	Нет	Черный, глубокий [1, 9]	Нержавеющая сталь, титан [1, 9]	Контраст, биосовместимость [5, 9]	Нужны ультракороткие импульсы [7]

Примечание: Ключевым технологическим параметром для всех методов выступает точный контроль диаметра луча, мощности и скорости сканирования [3, 7].

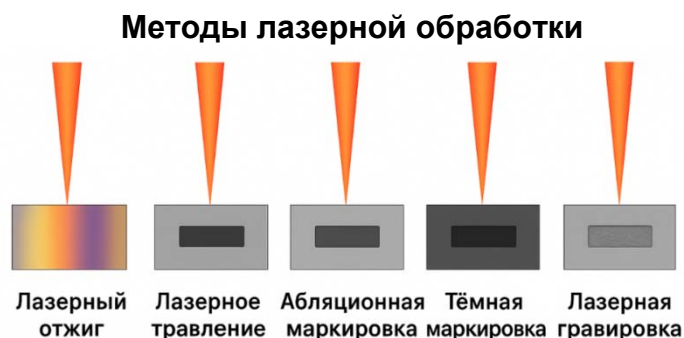


Рис. 5. Сравнение визуальных эффектов различных методов лазерной обработки

Сочетание различных методов (например, гравировки с локальным отжигом для получения цветного рельефа или создания матово-глянцевого контраста с помощью комбинации абляции и полировки) значительно расширяет художественные возможности и позволяет создавать уникальные визуальные эффекты для реализации сложных дизайнерских концепций [4, 5].

ВЫВОДЫ

Лазерные методы обработки открывают новые возможности в сфере художественного и промышленного дизайна металлических изделий. Их применение обеспечивает точное воспроизведение узоров, текстур, цветовых переходов и позволяет достигать высокого класса чистоты поверхности без использования химических реагентов и механического контакта [4–6].

Современные лазерные технологии позволяют реализовать концепцию кастомизации

продукции – от единичных украшений до серийной фурнитуры и интерьерных элементов [5]. Цифровое управление процессом обеспечивает гибкий переход от экспериментальных эскизов к промышленному производству.

Перспективные направления развития включают использование ультракоротких импульсов [7], интеграцию с CAD/CAM-системами, комбинацию с аддитивными технологиями и переход к экологически чистым производственным методам [6].

Таким образом, лазерная обработка металлов становится ключевым инструментом современного дизайна, объединяя точность инженерных технологий со свободой художественного замысла и предлагая полный цикл операций – от создания декоративной текстуры до ее финишного полирования, создавая основу для развития новых направлений декоративно-прикладного искусства и функционального дизайна [1, 4, 5, 10].

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Кончус Д. А., Сивенков А. В., Пряхин Е. И. Особенности лазерной маркировки металлических изделий // Информационно-технологический вестник. 2020. № 1. С. 157–164.
2. Цветков Д. М., Галанин С. И., Шорохов С. А. Лазерное декорирование поверхности стали AISI 304 // Технологии и качество. 2025. № 4(70). С. 78–83.
3. Ларионова Е. В. Разработка технологии получения воспроизводимых многоцветных изображений на металлических поверхностях с использованием лазеров : дис. ... канд. техн. наук. СПб. : СПбГУПТД, 2010. 168 с.
4. 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.
5. 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. С. 387–391.
6. Восстановление декоративного воронения с помощью лазерной обработки / М. Салхаб, Я. Джабр, Д. В. Журба, О. Г. Зотов // Наука настоящего и будущего. СПб., 2023. Т. 2. С. 60–63.
7. 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. Art. 519.
8. Галанин С. И. Лазерные технологии в ювелирном производстве : учеб. пособие. Кострома : Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2014. 108 с.
9. Петкова А. П., Ганзуленко О. Ю. Особенности технологии лазерной маркировки изделий из цветных металлов и сплавов с использованием матричных ультраплотных штрихкодов // Цветные металлы. 2022. № 7. С. 92–97.
10. Лазерные технологии, сопутствующие лазерной ударной обработке деталей: очистка, полировка, наплавка (обзор) / В. Ю. Железнов, Т. В. Малинский, В. Е. Роголин [и др.] // Успехи прикладной физики. 2023. Т. 11, № 4. С. 340–355.

REFERENCES

1. Konchus D. A., Sivenkov A. V., Pryakhin E. I. Features of laser marking of metal products. *Informacionno-tekhnologicheskij vestnik* [Information Technology Bulletin]. 2020;1:157–164. (In Russ.)
2. Tsvetkov D. M., Galanin S. I., Shorokhov S. A. Laser decoration of AISI 304 steel surface. *Tekhnologii i kachestvo* [Technologies & Quality]. 2025;4(70):78–83. (In Russ.)

3. Larionova E. V. Development of technology for producing reproducible multicolor images on metal surfaces using lasers. Cand. techn. sci. dis. Saint Petersburg, 2010. 168 p. (In Russ.)
4. 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.)
5. 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. P. 387–391. (In Russ.)
6. Salhab M., Jabr Y., Zhurba D. V., Zotov O. G., Parfenov V. A. Restoration of decorative crowning by laser treatment. *Nauka nastoyashchego i budushchego* [Science of the Present and Future]. Saint-Peterburg. 2023. Vol. 2. P. 60–63. (In Russ.)
7. 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.
8. Galanin S. I. Laser technologies in jewelry production: textbook. Kostroma, Kostroma St. Technol. Univ. Publ., 2014. 108 p. (In Russ.)
9. Petkova A. P., Ganzulenko O. Yu. Features of laser marking technology for non-ferrous metal products using matrix ultra-dense barcodes. *Cvetnye metally* [Non-ferrous metals]. 2022;7:92–97. (In Russ.)
10. Zheleznov V. Yu., Malinsky T. V., Rogalin V. E. [et al.] Laser technologies accompanying laser shock processing of parts: cleaning, polishing, cladding (review). *Uspekhi prikladnoj fiziki* [Advances in Applied Physics]. 2023;11,4:340–355. (In Russ.)

Статья поступила в редакцию 10.11.2025
Принята к публикации 09.02.2026

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Д. М. Цветков, старший преподаватель