



ВОЗМОЖНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ЦВЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ "COLORIT"

Г.В. Одинцова¹, к. т. н., *gvodintsova@corp.ifmo.ru*; В.П. Вейко¹, д. т. н.; С.Г. Горный², д. т. н.; В.К. Лыонг²; М.К. Москвин^{1,3}; В.В. Романов^{1,3}; Н.Н. Щедрина¹; Д.С. Лутошина¹; Д.А. Антипенкова¹; М.С. Кутепова¹

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург

² ООО "Лазерный центр", Санкт-Петербург

³ ООО "Проколорит", Санкт-Петербург

Представлена технология "Colorit" цветной лазерной маркировки металлов, в том числе и драгоценных, которая позволяет наносить цветное изображение без использования пигментов и красителей. Технология маркировки базируется на различных оптических эффектах: интерференции, дифракции света и поверхностного плазмонного резонанса. Изображения имеют высокое разрешение и обладают несколькими степенями защиты, что открывает дорогу использованию метода для защиты продукции от фальсификации.

Неотъемлемой частью любого современного производства является маркировка продукции. Она необходима для идентификации изделий и их отслеживания как на этапе производства, так и на этапе реализации продукции. Важное требование к маркировке любого изделия – это исключение ее влияния на свойства самих деталей и стойкость маркировочного знака к внешним воздействиям. Монохромная лазерная гравировка хорошо удовлетворяет данным требованиям и уже широко представлена на российском и зарубежном рынках [1]. Современные лазерные системы позволяют обрабатывать изделия сложной формы из различных материалов с высокой производительностью. В данной статье представлена технология цветной лазерной маркировки металлов (в том числе драгоценных), которая позволяет наносить цветное изображение без использования пигментов и красителей (за счет различных оптических эффектов: интерференции, дифракции света и поверхностного плазмонного резонанса), и при этом – с высоким разрешением. Изображение обладает несколькими степенями защиты,

PROSPECTS OF "COLORIT" TECHNOLOGY OF COLOR LASER LABELING

G. V. Odintsova¹, Candidate of Technical Science, *gvodintsova@corp.ifmo.ru*; V. P. Veiko¹, Doctor of Engineering Science; S. G. Gorniy², Doctor of Engineering Science; V. K. Luong²; M. K. Moskvina^{1,3}; V. V. Romanov^{1,3}; N. N. Shchedrina¹; D. S. Lutoshina¹; D. A. Antipenkova¹; M. S. Kuteпова¹

¹ ITMO University, St. Petersburg

² LLC Laser Center, St. Petersburg

³ LLC Prokolorit, St. Petersburg

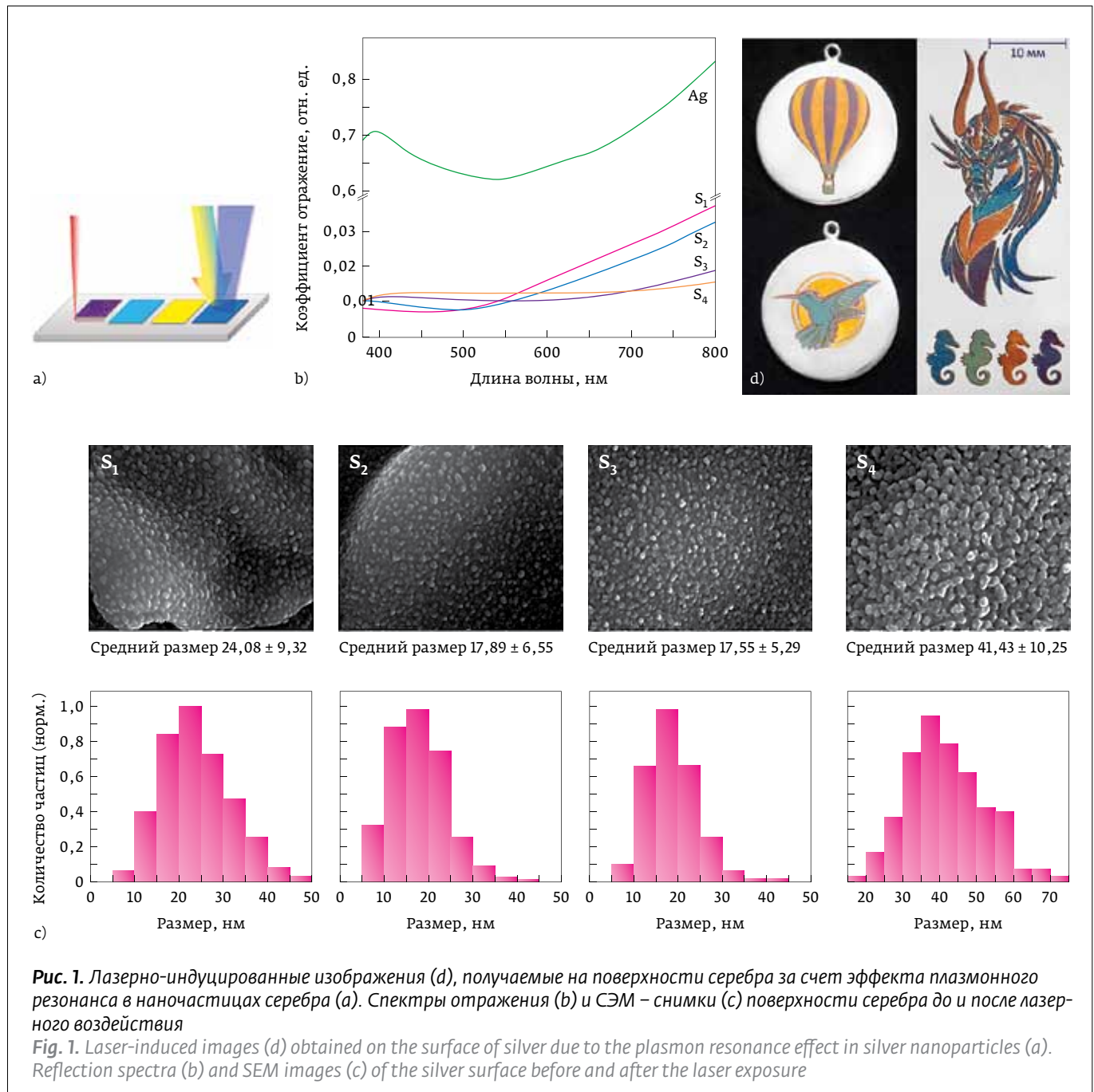
"Colorit" technology of color laser labeling of metals, including precious ones, is presented, which allows to apply a color image without the use of pigments and dyes. The labeling technology is based on various optical effects: interference, diffraction of light and surface plasmon resonance. The images are of high resolution and have several degrees of protection, which makes it possible to use the method to protect products from falsification.

An integral part of any modern production is product labeling. It is necessary for product identification and tracking both in production and in the sale of products. An important requirement for the labeling of any product is the lack of influence on the properties of the parts themselves, as well as the resistance of the label to external influences. Monochrome laser engraving is well suited to these requirements and is already widely represented in the Russian and foreign markets [1]. Modern laser systems allow processing complex products made of various materials with high efficiency. This article presents the technology of color laser labeling of metals (including precious ones), which allows to apply a color image without the use of pigments and dyes (due to various optical effects: interference, diffraction of light and surface plasmon resonance), with high resolution. The image has several degrees of protection, which allows using this method not only for decorative and identification purposes, but also to protect products from falsification. It is shown that the efficiency of the proposed "Colorit" technology is comparable to monochrome laser engraving. In the case of fault during labeling the product, the method of color correction during the imaging process is suggested. The resistance of the resulting color coatings to chemical and thermal effects is also demonstrated.

что дает возможность использовать данный метод не только в декоративных и идентификационных целях, но и для защиты продукции от фальсификации. Показано, что производительность предлагаемой технологии "Cologit" сравнима с монохромной лазерной гравировкой. Для случая возможного появления брака при маркировке изделия предложен метод корректировки цвета в процессе нанесения изображения. Также продемонстрирована устойчивость получаемых цветных покрытий к химическим и температурным воздействиям.

IS IT POSSIBLE TO OBTAIN COLOR FROM AIR?

It is known that when certain metals are heated in air, an oxide film is formed on their surface, due to the interference of light where the color changes. Based on this effect, the technology of color metal laser of [2] (commercial name "Colorit" [3]) was developed. The technology is an analog of monochrome laser engraving in color and makes it possible to obtain a color stable image with a high resolution on a metal surface with a high degree of protection against falsification. As a rule, color laser labeling is carried out using a pulsed fiber



ВОЗМОЖНО ЛИ ПОЛУЧИТЬ ЦВЕТ ИЗ ВОЗДУХА?

Известно, что при нагреве некоторых металлов на воздухе на их поверхности образуется оксидная пленка, за счет интерференции света в которой происходит изменение цвета. На основе этого эффекта была разработана технология цветной лазерной маркировки металлов [2] (коммерческое название "Colorit" [3]). Технология является аналогом монохромной лазерной гравировки в цвете и дает возможность получать цветное устойчивое изображение с высоким разрешением на металлической поверхности с высокой степенью защиты от фальсификации. Как правило, цветная лазерная маркировка осуществляется при помощи импульсного волоконного лазера [4–6], который обеспечивает необходимую стабильность пространственно-временных характеристик излучения. Примером такой системы является компактный прецизионный маркер "МиниМаркер 2" производства компании ООО "Лазерный центр" [7]. Интегральный цвет поверхности металлов после лазерного воздействия зависит как от интерференционных эффектов в верхнем оксидном слое (например в TiO_2 в случае обработки титана), так и от собственного цвета нижних окислов (например TiO , Ti_2O_3) [8–9]. Таким образом, могут быть окрашены только окисляющиеся на воздухе металлы и сплавы, например нержавеющие стали, титановые и медные сплавы, тугоплавкие металлы.

ВОЗМОЖНО ЛИ ЛАЗЕРНОЕ ОКРАШИВАНИЕ ДРАГОЦЕННЫХ МЕТАЛЛОВ?

Существует потребность адаптации технологии лазерного окрашивания для неокисляющихся на воздухе металлов, например драгоценных. Одним из возможных решений данной задачи является окрашивание благородных металлов за счет поверхностного плазмонного резонанса (ППР) на наночастицах, образующихся при лазерном облучении в воздушной среде (демонстрация эффекта, проявляющегося с помощью ультракоротких (УК) лазерных импульсов, отражена в работе [10]). В данной работе для реализации предложенного механизма было решено использовать волоконный лазер с УК импульсами наносекундной длительности. При лазерном нагревании поверхности металла выше температуры испарения формируются наночастицы сферической формы, оседающие из парового облака на обрабатываемую поверхность. За счет ППР-эффекта в полученных наночастицах (10–50 нм) происходит избирательное поглощение падающего белого света, в то время как отраженные длины волн придают поверхности желаемый цвет (рис. 1а). По снимкам

laser [4–6], which provides the necessary stability of the space-time radiation characteristics. An example of such a system is a compact precision marker "MiniMarker 2" by LLC "Laser Center" [7]. The integral color of the surface of metals after laser exposure depends both on interference effects in the upper oxide layer (e. g., TiO_2 in the case of titanium treatment) and on the intrinsic color of the lower oxides (e. g., TiO , Ti_2O_3) [8–9]. Thus, only metals oxidized in air and alloys, e. g., stainless steels, titanium and copper alloys, refractory metals, can be stained.

IS THE LASER STAINING OF PRECIOUS METALS POSSIBLE?

There is a need to adapt the laser staining technology to non-oxidizing metals, e. g., precious metals. One possible solution to this problem is the staining of precious metals due to surface plasmon resonance (SPR) on the nanoparticles formed by laser irradiation in the air, which was well demonstrated in [10] by means of ultrashort laser pulses. In this paper, to implement the proposed mechanism, it was decided to use a fiber laser of nanosecond duration. After laser heating of the metal surface above the evaporation temperature, spherical nanoparticles are formed, deposited from the vapor cloud on the surface being treated. Due to the SPR effect in the obtained nanoparticles (10–50 nm), selective absorption of the incident white light occurs, while

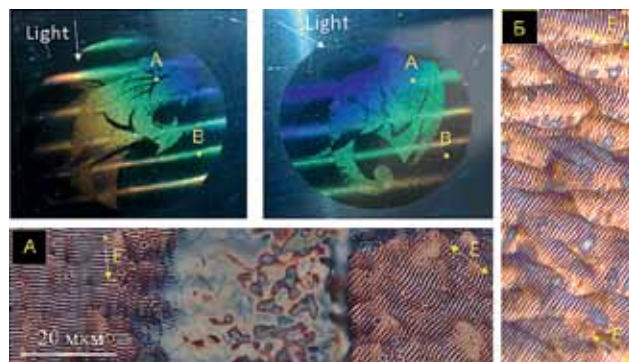


Рис. 2. Лазерно-индуцированные изображения, полученные на поверхности стали вследствие дифракции света на ППС, представленных на микрофотографиях. Показаны эффекты движения отдельных элементов и присутствия двух изображений при изменении угла зрения (желтые стрелки указывают направление поляризации лазерного излучения)

Fig. 2. Laser-induced images obtained on the steel surface due to diffraction of light on the SPS, shown in the microphotographs. The effects of motion of individual elements and the availability of two images are shown with a change in the angle of view. The yellow arrows show the direction of polarization of the laser radiation

со сканирующего электронного микроскопа (рис. 1с) видно, что на цвет поверхности серебра влияют форма и размер наночастиц, а также расстояние между ними. Причем с уменьшением расстояния между наночастицами минимум спектра отражения сдвигается в ультрафиолетовую область (рис. 1б). Примеры получаемых изображений на поверхности серебра приведены на рис. 1д.

ВОЗМОЖНО ЛИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА СОЗДАТЬ ЗАЩИТНОЕ "ГОЛОГРАФИЧЕСКОЕ" ИЗОБРАЖЕНИЕ НЕПОСРЕДСТВЕННО НА ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛА?

К одной из функций маркировки относится защита продукции от фальсификации. Технология прямого лазерного структурирования металлов за счет возбуждения поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) позволяет создавать цветные изображения по типу защитных голограмм.

Запись "голограммы" можно реализовать за счет формирования поверхностных периодических структур (ППС) с периодом порядка длины волны лазерного излучения непосредственно на поверхности металла вследствие интерференции падающего света с возбуждаемой ПЭВ [11]. Направление штрихов, сформированных таким методом структур, перпендикулярно направлению плоскости поляризации лазерного излучения. В данной работе продемонстрирована запись ППС с помощью волоконного импульсного лазера с наносекундной длительностью. Изменение направления поляризации лазерного излучения непосредственно во время обработки позволяет получить эффект движения отдельных элементов (данный эффект представлен на рис. 2 в виде смещения горизонтальной линии (область Б) при изменении угла зрения). При записи отдельных элементов рисунка с различным направлением ППС достигается эффект присутствия нескольких изображений при изменении угла зрения (область А). Таким образом, лазерно-индуцированная защитная идентификационная метка содержит как визуально наблюдаемые, так и скрытые признаки для проверки подлинности. К визуальным признакам относятся: изменение типа и цвета изображения, а также его смещение при изменении угла зрения. К скрытым

the reflected wavelengths give the surface the desired color (Fig. 1A). The images from the scanning electron microscope (Fig. 1B) allows us to see that the shape and size of the nanoparticles, as well as the distance between them depend on the color of the silver surface. And with a decrease in the distance between nanoparticles, the minimum of the reflection spectrum shifts to the ultraviolet region (Fig. 1B). Examples of the images obtained on the silver surface are shown in Fig. 1D.

IS IT POSSIBLE, WITH THE HELP OF A LASER, TO CREATE A PROTECTIVE "HOLOGRAPHIC" IMAGE DIRECTLY ON THE METAL SURFACE?

One of the labeling functions is to protect the product from falsification. The technology of direct laser structuring of metals by excitation of a surface electromagnetic wave (SEW) allows creating color images similar to protective holograms.

The recording of the "hologram" can be implemented due to the formation of surface periodic structures (SPS) with a period on the order of the wavelength of the laser radiation directly on the metal surface due to interference of the incident light with the excited SEW [11]. The direction of the structures formed by this method is perpendicular to the direction of polarization of the laser radiation. In this paper, we demonstrate the recording of a SPS using a fiber-optic pulse laser with nanosecond duration. A change in the direction of polarization of the laser radiation directly during processing makes it possible to obtain the effect of the motion of individual elements (this effect is shown in Figure 2 as a displacement of the horizontal line (region B) with a change in the angle of view). When recording

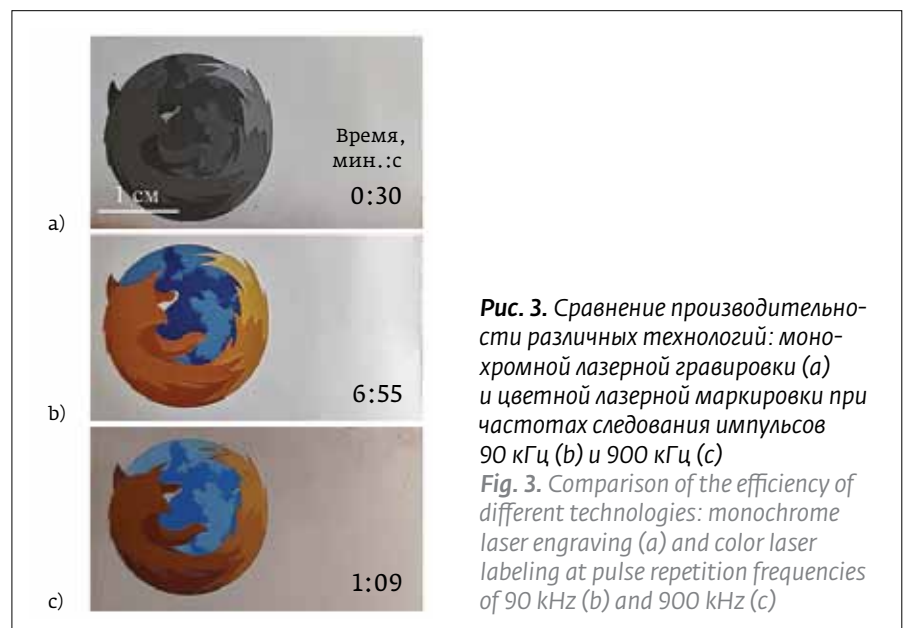


Рис. 3. Сравнение производительности различных технологий: монохромной лазерной гравировки (а) и цветной лазерной маркировки при частотах следования импульсов 90 кГц (б) и 900 кГц (с)

Fig. 3. Comparison of the efficiency of different technologies: monochrome laser engraving (a) and color laser labeling at pulse repetition frequencies of 90 kHz (b) and 900 kHz (c)

признакам подлинности относятся наличие различных типов периодических структур (канавки, углубления) при рассмотрении их под микроскопом с увеличением более $100\times$ и точное совпадение колориметрических координат с ранее разработанным шаблоном в результате считывания изображений на офисном сканере (подробнее можно ознакомиться в [12]).

ВОЗМОЖНО ЛИ ОБЕСПЕЧИТЬ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ЦВЕТНОЙ ЛАЗЕРНОЙ МАРКИРОВКИ СРАВНИМУЮ С МОНОХРОМНОЙ ГРАВИРОВКОЙ?

Но на пути внедрения технологии цветной лазерной маркировки в промышленное производство встает проблема. Ее появление связано с низкой производительностью методов маркировки, использующих такую технологию. Например, время маркировки логотипа площадью 3 см^2 при частоте следования импульсов 90 кГц составляет 6 минут 55 секунд (рис. 3б), в то время как время маркировки такого же логотипа уже широко применяемым методом лазерной гравировки составляет 30 секунд (рис. 3а). С целью приблизить производительность цветной маркировки к скорости монохромной гравировки авторы предложили перейти от импульсного режима к квазинепрерывному режиму работы и использовать режимы с повышенными частотами (до 1 МГц). На данный момент удалось воспроизвести широкую палитру цветов при режиме работы с высокими частотами, что значительно сократило время обработки поверхности металла. Например, время маркировки рассматриваемого логотипа при частоте следования импульсов 900 кГц составило 1 минуту 9 секунд (рис. 3с).

ВОЗМОЖНО ЛИ ИСПРАВИТЬ ЦВЕТ ИЗОБРАЖЕНИЯ В СЛУЧАЕ БРАКА ПРИ НАНЕСЕНИИ МАРКИРОВКИ?

Во время лазерной маркировки изделия может возникнуть брак (цвет изображения будет иметь неверные колориметрические координаты). За счет послойного наращивания оксидной пленки (повторных проходов лазера) возможно скорректировать цвета в процессе лазерного воздействия (см. рис. 4: цифрой 1 показан желаемый цвет, цифрой 2 – полученный после лазерного воздействия, при повторном проходе режимом № 3 возможно получение цвета № 4 по колориметрическим координатам схожего с цветом № 1). Таким образом методом послойного наращивания оксидной пленки можно изменять цвет изображения в процессе лазерного окрашивания.

individual elements of a pattern with a different direction of the SPS, the effect of the presence of several images when the angle of view is changed (region A) is achieved. Thus, a laser-induced security identification tag contains both visually observable and hidden features for authenticity verification. The visual signs include: changing the type and color of the image, as well as its displacement when changing the angle of view. The hidden signs of authenticity include the presence of different types of periodic structures (grooves, recessions) when viewed under a microscope with magnification of more than $100\times$ and the exact coincidence of colorimetric coordinates with a previously developed template as a result of reading images on an office scanner (for more details see [12]).

IS IT POSSIBLE TO PROVIDE COLORED LASER LABELING EFFICIENCY COMPARABLE TO THAT OF THE MONOCHROME ENGRAVING?

There is a problem of introducing color laser labeling technology into the industrial production due to its low efficiency. For example, the logo labeling time with an area of 3 cm^2 at a pulse repetition rate of 90 kHz is 6 minutes 55 seconds (Figure 3B), while the time for labeling the same logo using already widely used laser engraving is 30 seconds (Figure 3A). In order to bring the color labeling performance closer to monochrome engraving, the authors proposed to switch to quasi-continuous mode of operation and use modes with increased frequencies (up to 1 MHz). Currently, it was possible to reproduce a wide range of colors in the mode

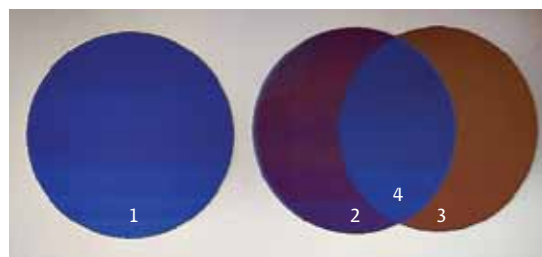


Рис. 4. Примеры изображения с одними и теми же колориметрическими координатами: полученный за один проход лазерного воздействия (цвет № 1), полученный методом послойного наращивания оксидной пленки (цвет № 4): за счет повторного прохода по цвету № 2 режимом воздействия, дающим цвет № 3

Fig. 4. An example of an image with the same colorimetric coordinates obtained in a single pass of the laser exposure (color No. 1) and by layer-by-layer build-up of the oxide film (color No. 4): by repeated passage over color No. 2 by the exposure regimen giving color No. 3

КАКОВА ХИМИЧЕСКАЯ И ТЕМПЕРАТУРНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ "COLORIT"?

Проведены исследования с целью определения химической устойчивости цветных покрытий, полученных по технологии "Colorit". В качестве материала для исследования были выбраны титановые (Grade 2) и стальные (AISI 304) пластинки, как наиболее часто используемые конструкционные материалы, с шестью основными цветами. В ходе испытаний образцы помещались на 48 часов в следующие вещества: H_2SO_4 (40%), NaOH (10%), C_2H_5OH (98%) и поверхностно-активное вещество (ПАВ) "New ultrasil 69". Было установлено, что покрытие на титане неустойчиво к щелочному воздействию, а покрытие на стали – к кислотному (рис. 5). Так же были проведены исследования устойчивости покрытий в тепловой камере. Покрытие на титане устойчиво при любой температуре от -40 до 100 °C и повышенной влажности от 70 до 90%. Покрытие на стали оказалось неустойчивым при температуре 100 °C и 90% влажности. Таким образом, результаты данных исследования нужно учитывать при внедрении данной технологии в реальное производство.



Рис. 5. Результаты тестирования химической устойчивости покрытий к воздействию в течение 48 часов H_2SO_4 (40%), NaOH (10%), C_2H_5OH (98%) и ПАВ (зеленой рамкой выделены положительные тесты, красной – отрицательные)

Fig. 5. The results of testing the chemical resistance of coatings during 48-hour exposure to H_2SO_4 (40%), NaOH (10%), C_2H_5OH (98%) and surfactant. Positive tests are designated with a green box, red box denotes negative tests

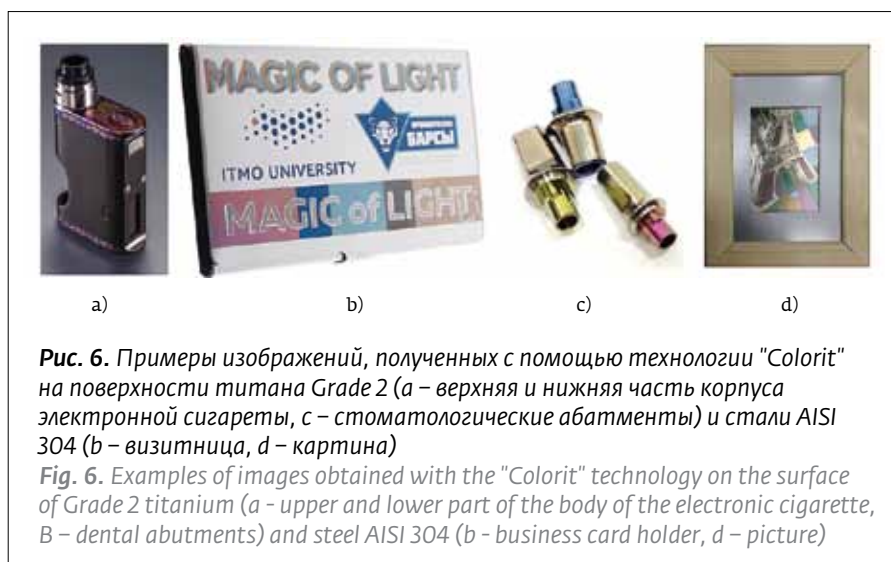


Рис. 6. Примеры изображений, полученных с помощью технологии "Colorit" на поверхности титана Grade 2 (а – верхняя и нижняя часть корпуса электронной сигареты, с – стоматологические абатменты) и стали AISI 304 (b – визитница, d – картина)

Fig. 6. Examples of images obtained with the "Colorit" technology on the surface of Grade 2 titanium (a - upper and lower part of the body of the electronic cigarette, B - dental abutments) and steel AISI 304 (b - business card holder, d - picture)

Предлагаемая технология имеет важное практическое значение для нанесения цветного износостойкого изображения на поверхность металлов (нержавеющие стали, титановые, медные сплавы, драгоценные и тугоплавкие металлы и др.) с хорошим разрешением без использования красителей, этикеток и т.д. Наносимая идентификационная метка обладает несколькими степенями защиты как визуально наблюдаемыми (изменение типа и цвета изображения, его смещение при изменении угла зрения), так и скрытыми (наличие различных типов периодических структур при рассмотрении их под микроскопом, точное совпадение колориметрических координат с ранее разработанным шаблоном), которые отвечают основным требованиям, предъявляемым к защитным голограммам. Таким образом, маркировка обеспечивает многоуровневую защиту от фальсификации продукции. Необходимо отметить, что технология цветной лазерной маркировки реализуется с помощью широко внедренных в промышленное производство комплексов на основе волоконных лазеров, и ее производительность сравнима с монохромной лазерной гравировкой, которую используют многие российские предприятия.

Технология уже находит свое применение во многих областях промышленности: окрашивание деталей и маркировка приборных панелей в машино- и приборостроении (рис. 6а), нанесение логотипов предприятий на сувенирную продукцию (рис. 6б), создание защитного нетоксичного покрытия на медицинских изделиях из титана (рис. 6с), а также создание изделий с неповторимым дизайном в ювелирном деле (см. рис. 1d), современном искусстве (рис. 6d) и многое другое.

of operation with high frequencies, which significantly reduced the processing time of the metal surface. For example, the time for labeling the logo under consideration at a pulse repetition rate of 900 kHz was 1 minute 9 seconds (Figure 3B).

IS IT POSSIBLE TO CORRECT THE COLOR OF THE IMAGE IN THE CASE OF FAULTS DURING LABELING?

During the laser labeling of the product, a fault may occur (the color of the image will have incorrect colorimetric coordinates). Due to the layer-by-layer build-up of the oxide film (repeated passages of the

laser), it is possible to correct the colors in the course of the laser exposure (see Figure 4: 1 designated the desired color, 2 designates the color obtained after laser exposure, in the second pass in mode No. 3 it is possible to obtain color No. 4 according to the colorimetric coordinates similar to those of color No. 1). Thus, by the method of layer-by-layer build-up of an oxide film, it is possible to change the color of the image during the laser staining process.

WHAT IS THE CHEMICAL AND TEMPERATURE RESISTANCE OF COATINGS OBTAINED BY "COLORIT" TECHNOLOGY?

Research has been carried out to determine the chemical resistance of color coatings obtained using the "Colorit" technology. As a material for the study, titanium (Grade 2) and steel (AISI 304) plates were chosen, as the most commonly used construction materials, with six primary colors. During the tests, the samples were placed for 48 hours in the following substances: H_2SO_4 (40%), NaOH (10%), C_2H_5OH (98%) and surfactant "New ultrasil 69". It was found that the coating on titanium is not resistant to alkali, and the coating on steel is not resistant to acid (Fig. 5). In the same manner, the investigations of the stability of coatings in a thermal chamber were carried out. The coating on titanium is stable at any temperature from $-40\text{ }^\circ\text{C}$ to $+100\text{ }^\circ\text{C}$ and high humidity from 70% to 90%. The coating on steel proved to be unstable at $100\text{ }^\circ\text{C}$ and 90% humidity. Thus, the results of this research should be taken into account when implementing this technology in the actual production.

The proposed technology is of great practical importance for applying a color wear-resistant image to the surface of metals (stainless steels, titanium, copper

ЛИТЕРАТУРА

1. **Валиулин А. и др.** Лазерная маркировка материалов // Фотоника, 2007, № 3, с.16–22. **Valiulin A. et al.** Lasernaya markirovka materialov // Photonics, 2007, № 3, p.16–22.
2. **Veiko V. et al.** Controlled oxide films formation by nanosecond laser pulses for color marking // Optics express, 2014, v. 22, № 20, p. 24342–24347. Laser Center, URL: <https://www.procolorit.com/technology/>.
3. **Khafaji N. Y. et al.** Optical characterization of laser coloured titanium under different processing atmospheres // Surface and Coatings Technology, 2017, v. 321, p. 156–163.
4. **Adams D. P. et al.** Nanosecond pulsed laser irradiation of stainless steel 304L: Oxide growth and effects on underlying metal // Surface and coatings technology, 2013, v. 222, p. 1–8.
5. **A. J. et al.** The influence of process parameters on the laser-induced coloring of titanium // Applied Physics A, 2014, v. 115, № 3, p. 1003–1013. Laser Center, URL: <https://www.newlaser.ru/tech/>.
7. **Ageev E. I. et al.** Composition analysis of oxide films formed on titanium surface under pulsed laser action by method of chemical thermodynamics // Laser Physics, 2017, v. 27, № 4, p. 046001.
8. **Lavisse L. et al.** Growth of titanium oxynitride layers by short pulsed Nd: YAG laser treatment of Ti plates: influence of the cumulated laser fluence // Applied Surface Science, 2009, v. 255, № 10, p. 5515–5518.
9. **Guay J. M. et al.** Laser-induced plasmonic colours on metals // Nature communications, 2017, v. 8, p. 16095.
10. **Simões J., Riva R., Miyakawa W.** High-speed Laser-Induced Periodic Surface Structures (LIPSS) generation on stainless steel surface using a nanosecond pulsed laser // Surface and Coatings Technology, 2018, v. 344, p. 423–432.
11. **Ageev E. I. et al.** Controlled nanostructures formation on stainless steel by short laser pulses for products protection against falsification // Optics express, 2018, v. 26, № 2, p. 2117–2122.

alloys, precious and refractory metals, etc.) with good resolution without using dyes, labels, etc. The applied identification mark has several degrees of protection both visually observable (changing the type and color of the image, its displacement when changing the angle of view) and hidden ones (availability of different types of periodic structures when viewing them under a microscope, the exact coincidence of colorimetric coordinates with a previously developed template) that meet the basic requirements for protective holograms. Thus, the labeling provides multi-level protection from product falsification. It should be noted that the technology of color laser labeling is implemented with the help of fiber-laser complexes widely implemented in industrial production, and its efficiency is comparable to that monochrome laser engraving, which is used by many Russian enterprises.

The technology already finds its application in many areas of industry: staining of components and labeling instrument panels in machine and instrument engineering (Fig. 6A), printing of logos of enterprises on souvenir products (Fig. 6B), creating a protective non-toxic coating on medical products made of titanium (Fig. 6B), as well as the creation of products with a unique design in jewelry (Fig. 1D), modern art (Fig. 6D) and much more.