

## ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОГО КОЛЬОРОВОГО МАРКУВАННЯ СТАЛЕЙ

Афанасьєва О. В.<sup>1</sup>, Лалазарова Н. О.<sup>2</sup><sup>1</sup>Харківський національний університет радіоелектроніки,<sup>2</sup>Харківський національний автомобільно-дорожній університет

**Анотація.** Здійснено кольорове маркування корозостійкої сталі за допомогою лазерів різних типів. В основі кольорового маркування металів є процес утворення на поверхні зразка плівок з оксидів оброблюваного матеріалу під впливом лазерного випромінювання. Встановлено, що повнокольорове маркування може бути отримано тільки за допомогою волоконного лазера. На основі попередніх розрахунків температурно-часових параметрів випромінювання та проведених експериментів встановлено, що колір маркування визначається кількістю імпульсів в точку.

**Ключові слова:** кольорове лазерне маркування, лазерне гравірування, імпульсне лазерне випромінювання, твердотільний лазер, волоконний лазер, частота проходження імпульсів.

## Вступ

Лазерне маркування – нанесення текстових і графічних зображень на поверхню виробу під впливом високоінтенсивного лазерного випромінювання. Маркування деталей, вузлів або кінцевого виробу дозволяє виробнику контролювати обсяг продукції, що випускається, її якість та просувати свою торговельну марку.

Користувач отримує на маркованому виробі інформацію про тип і параметри продукції, а також гарантію якості від виробника. З усіх наявних способів маркування найбільш сучасним і гнучким методом є лазерне маркування, оскільки воно дозволяє керувати лазерним випромінюванням, точно дозуючи енергію для маркування в просторі і часі. Лазерні системи дозволяють отримати довготривале, знос- та термостійке, а також стійке до хімічних і механічних впливів та захищене від підробок маркування.

## Аналіз публікацій

Лазерне маркування характеризується високим рівнем якості, точності та швидкості нанесення, не впливає на властивості продукції, що маркується. Останнім часом лазерне маркування використовують також під час виготовлення різної сувенірної продукції [1, 2].

Існує чотири типи лазерного впливу на поверхню оброблюваного матеріалу: гравірування поверхні видаленням матеріалу, створення кольорного поверхневого контрасту, оплавлення поверхні, гравірування з оплавленням (рис. 1).

Під час гравірування під дією сфокусованого випромінювання видаляється частина матеріалу – до 100 мкм у випадку звичайного маркування, до 0,5 мм у випадку художнього

гравірування або 3,5 мм під час глибокого гравірування.

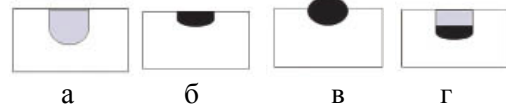


Рис. 1. Типи впливу лазерного випромінювання на поверхню оброблюваного матеріалу: а – гравірування поверхні видаленням матеріалу; б – поверхневий контраст; в – оплавлення поверхні; г – гравірування з оплавленням

Маркування стає добре видимим, оскільки світло, що падає, розсіюється в каналах поруч з немаркованим матеріалом. Технологія отримала широке застосування у всіх галузях виробництва. У мікроелектроніці вона застосовується для маркування заготовок, виробів і оснащення на всіх стадіях розроблення та виробництва, наприклад для кремнієвих пластин [1]. Гравірування найчастіше наносять на метал (зазвичай на вироби з вуглецевої і нержавкої сталі), кераміку, оргскло й акрил.

Поверхневий кольоровий контраст у неметалевих матеріалах виникає у випадку фотохімічного впливу на поверхню матеріалу, що маркується. Цей тип маркування застосовується переважно для неметалів, які знебарвлюються під дією УФ-випромінювання.

В основі кольорового маркування металів є процес утворення на поверхні зразка плівок з оксидів і нітрідів оброблюваного матеріалу під впливом лазерного випромінювання. Оксидні плівки формуються під час лазерного оброблення на відкритому повітрі. Для отри-

мання нітридних плівок метали обробляють у спеціальній камері з піддувом азоту. В обох випадках колір плівки залежить від її хімічного складу і товщини. На практиці частіше створюють оксидні плівки, оскільки цей процес не вимагає спеціального технологічного оснащення для азотування.

Оксидні плівки формуються в результаті однорідного нагрівання поверхні металу, що стимулює процес його окислення. Такий метод застосовується ще з давніх часів в металургії для художнього та промислового оброблення металевих виробів.

Однак лазерна технологія отримання кольорових оксидних плівок має декілька значних переваг, зокрема швидкість і локальність впливу, а також високу точність оброблення. Це досягається завдяки невеликому (десятки мікрометрів) діаметру лазерного променя та використанню високоточних швидкісних систем сканування.

Поява кольору та його зміна зумовлені інтерференцією світла, яке виникає в результаті складання хвиль, що відбиваються від поверхневого шару оксидної плівки та поверхні самого металу. У цьому випадку зі зростанням товщини оксиду послідовно виникають умови гасіння променів з тією чи іншою довжиною хвилі, в результаті чого колір плівки може змінюватися від фіолетового до червоного. Однак на колір плівки впливає також і ступінь шорсткості поверхні металу.

Під час маркування плавленням матеріал досягає його температури, і через хімічний розпад, ефекти окислення або зміну в поверхневій морфології виникає видиме маркування. Цей метод не є популярним під час маркування металевих поверхонь саме через низький контраст.

Гравірування поверхні з оплавленням – комбінація видалення матеріалу з оплавленням, яке зосереджується в основі гравірованого каналу.

### Мета і постановка завдання

Метою дослідження є розроблення режимів кольорового лазерного маркування (поверхневий кольоровий контраст) корозостійкої сталі за допомогою лазерів різних типів.

Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання:

- 1) проведення розрахунків температурно-часових параметрів випромінювання у випадку використання лазерів різних типів;
- 2) вивчення впливу параметрів лазерного випромінювання на колір поверхні сталі;
- 3) розроблення режимів кольорового маркування сталі волоконним лазером.

### Розроблення технології лазерного кольорового маркування сталей

Основними параметрами, що характеризують лазерне випромінювання, є потужність, довжина хвилі випромінювання, тривалість впливу випромінювання, енергія і частота проходження імпульсів, а також когерентність, спрямованість, монохроматичність і поляризація випромінювання.

Більшість лазерних технологій базується на тепловій дії випромінювання, тобто на необхідності нагрівання об'єкта впливу до заданої температури. Отже, головною характеристикою лазера, який використовується в таких технологіях, є його потужність. Для імпульсних лазерів розглядають потужність в імпульсі та середню потужність, яка залежить від тривалості та частоти проходження імпульсів.

Як змінні параметри в цій роботі обрано довжину хвилі випромінювання, яка визначається типом лазера, потужністю випромінювання та тривалістю лазерного впливу, що залежить від тривалості імпульсів, частоти їх проходження та швидкості переміщення лазерного випромінювання вздовж поверхні оброблюваного матеріалу.

На сьогодні з технологічною метою використовуються три типи лазерів: газові, твердотільні і волоконні. Газові CO<sub>2</sub>-лазери, потужністю понад 1 кВт, надійні в експлуатації, вони мають автоматизовану систему керування технологічним комплексом та застосовуються для різних технологічних операцій, зокрема для маркування. Однак висока вартість таких комплексів та їх низька продуктивність під час оброблення металів обмежують застосування цих лазерів [3, 4].

Твердотільні лазери, насамперед на алюмо-ітрієвому гранаті (Nd<sup>3+</sup>:YAG-лазери), мають, порівнюючи з газовими, декілька переваг. Вони більш компактні та мають більш високі значення коефіцієнта корисної дії. Одночасно з цим YAG-лазери більше коштують і вимагають великих експлуатаційних витрат. Для маркування використовуються YAG-лазери, що працюють як в безперервному, так і в імпульсному режимі.

На сьогодні найперспективнішими технологічними інструментами є волоконні лазери. До їхніх переваг належить висока ефективність (до 50 %), що веде до більш низьких експлуатаційних витрат, а невеликі розміри дозволяють легко вбудовувати їх до системи виробництва.

У цій роботі дослідження проводились саме на цих типах лазерів та на установках

Trotex 8003 Speedy C40 на базі CO<sub>2</sub>-лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм, середня потужність у безперервному режимі дорівнює до 20 Вт), JQ-YAG-50 на основі Nd:YAG лазера ( $\lambda = 1,06$  мкм, середня потужність дорівнює до 50 Вт), міні-Маркер2 на основі ітербієвого волоконного лазера ( $\lambda = 1,03$  мкм, середня потужність дорівнює до 20 Вт).

Лазерне кольорове маркування можна створити на металі, здатному до окислення, тобто на будь-якому металі чи сплаві, за винятком золота та металів платинової групи. Оксидна плівка, утворена під час лазерного нагрівання на поверхні активних металів, є нестійкою і з часом тьмяніє через подальше атмосферне окислення.

Якісне та стійке кольорове маркування можна одержати лише на металах, що пасивуються, тобто на таких, що мають свою щільну оксидну плівку, наприклад на неіржавкій сталі, алюмінії, титані та їхніх сплавах. У роботі як матеріал для дослідження була обрана корозостійка сталь марки 12X18H10T після електрополірування (стан поставляння). Сталь 12X18H10T – неіржавка титаномістка аустенітного класу. Її хімічний склад регламентований ГОСТом 5632-72.

Під час нагрівання матеріалу до певних температур на його поверхні утворюються оксидні шари різної товщини. Залежно від товщини шару виникають умови поглинання променів з тією чи іншою довжиною хвилі. Внаслідок цього можна спостерігати кольори мінливості на поверхні металу. Залежно від температури нагрівання матеріалу змінюються і параметри оксидних шарів, а отже, змінюється і колір поверхні.

Для теоретичних розрахунків параметрів лазерного випромінювання необхідно знати залежність кольору від температури нагрівання поверхні. Для цього був проведений експеримент, під час якого зразки з корозостійкої сталі нагрівалися в лабораторній термічній печі СНОЛ/11 за температури від 300 до 700 °С з інтервалом 50 °С. Після фотографування зразків була розроблена шкала залежності кольору від температури (рис. 2).



Рис. 2. Шкала залежності кольору від температури

Для подальших досліджень було обрано температури 400, 500, 600 і 650 °С, оскільки саме за цих температур можна отримати більш насичені кольори.

Далі необхідно було підібрати параметри лазерного випромінювання таким чином, щоб поверхня матеріалу нагрівалася саме за цих температур, оскільки зміна температурного режиму навіть на 20°C може змінити колір. Попередній розрахунок температурно-часових параметрів випромінювання здійснювався за рекомендаціями [5].

Згідно з розрахунками, для досягнення поставленої мети потужність випромінювання повинна дорівнювати 16,5–20 Вт у безперервному режимі. Точно розрахувати потужності та тривалість впливу неможливо, оскільки формули не враховують товщину матеріалу, зміну його поглинальної здатності в процесі оброблення, можливість оброблення у декілька етапів. Тому точний підбір параметрів лазерного випромінювання здійснювався експериментальним шляхом.

Дослідження продемонстрували, що використання CO<sub>2</sub>-лазера є недоцільним не тільки для створення кольорового маркування, а й для гравірування. Оброблені ділянки мали вигляд гравірування з оплавленням і обвуглюванням. Необхідно зазначити, що випромінювання CO<sub>2</sub>-лазерів є більш складним процесом, що набагато важче піддається тимчасовому і просторовому перетворенню, ніж випромінювання твердотільних лазерів [3]. Це значно ускладнює застосування CO<sub>2</sub>-лазерів в імпульсному режимі для лазерного маркування.

Під час експериментів із застосуванням Nd:YAG-лазера було отримано поєднання гравірування з частковим кольоровим контрастом. Жоден з досліджених режимів не дозволив отримати повнокольорового маркування, оскільки на всіх зразках оксидні плівки були сіро-чорного кольору різної насиченості, іноді із блакитним відтінком, оброблена поверхня мала досить виражений рельєф. На рис. 3 подано фрагмент поверхні, обробленої за середньої потужності 17 Вт і швидкості оброблення 5 мм/с. Частота проходження імпульсів змінювалась від 20 (зразок 1) до 2 (зразок 2) кГц.

Встановлено, що зменшення частоти робить рельєф поверхні грубішим, а зображення стає більш темним. Зокрема зміни є незначними і не дозволяють сподіватися на створення кольорового зображення.

На рис. 4 поданий процес впливу швидкості оброблення за частотою проходження імпульсів 12 кГц (рядок 1), 18 кГц (2) та 20 кГц (3). У кожному рядку швидкість оброблення

зростала від 10 до 60 мм/с. Як зазначена на рис. 4, швидкість сканування також незначною мірою впливає на результат оброблення.

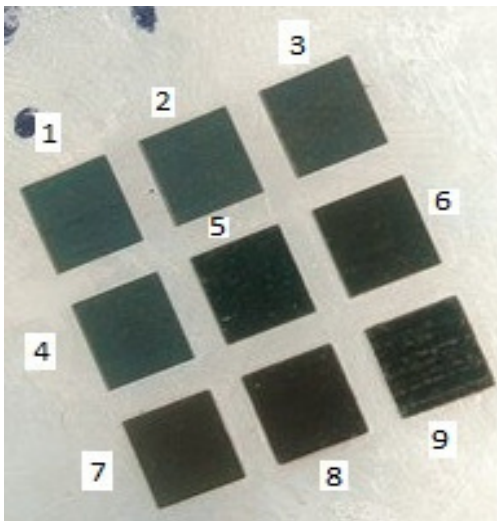


Рис. 3. Вплив частоти проходження імпульсів на колір та рельєф поверхні

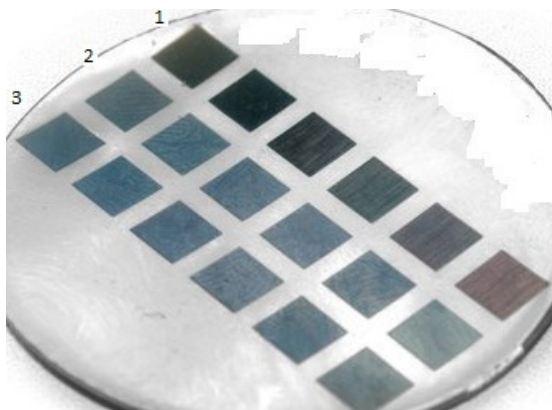


Рис. 4. Вплив швидкості сканування на колір та рельєф поверхні

Після фотографування зразків був отриманий код кольору в графічному редакторі CorelDRAW. У подальшій роботі може бути розроблена таблиця залежності коду кольору від параметрів випромінювання, після чого такий тип маркування можна використовувати як у виробництві (штрих-коди, серійні номери тощо), так і для декоративної продукції (створення різних монохроматичних орнаментів і рисунків).

Порівняння рельєфу зразків, оброблених за різними режимами (рис. 5), демонструє, що зміна параметрів в досліджених межах не дозволяє одержати кольорове зображення за допомогою гравірувального приладу на базі Nd:YAG-лазера. Водночас результати цих досліджень можуть бути використані для гравірування монохромних зображень.

Отримати кольорове маркування вдалося тільки за допомогою волоконного лазера (рис. 6). Особливості конструкції приладу Міні-маркер 2 на основі ітербійового волоконного лазера дозволить здійснювати оброблення за умов постійних параметрів (потужність – 20 Вт, частота проходження імпульсів – 20 кГц), змінюючи кількість імпульсів в точку. Подаючи 5, 10 і 20 імпульсів в точку, можна отримати жовтий, червоний і синьо-сірий кольори без зміни шорсткості поверхні.

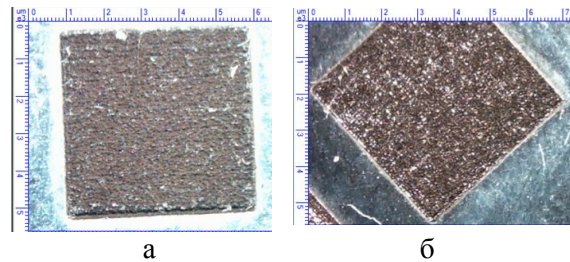


Рис. 5. Рельєф поверхні за різних режимів оброблення: а – частота проходження імпульсів – 4 кГц, швидкість оброблення – 5 мм/с, б – частота проходження імпульсів – 12 кГц, швидкість оброблення – 20 мм/с

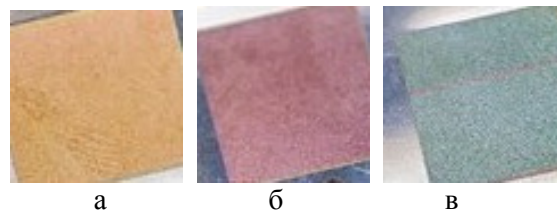


Рис. 6. Залежність кольору поверхні від кількості імпульсів: а – 5 імпульсів, б – 10, в – 15 імпульсів в точку

Отримані кольори, згідно зі шкалою залежності кольорів від температури, відповідають температурам 400, 500 і 700 °С. Відомо, що колір оксидної плівки залежить від температури поверхні і хімічного складу матеріалу. У методиці визначення температури поверхні під час процесу імпульсного оброблення, наведеній в [4], довжина хвилі випромінювання враховується опосередковано: вона впливає на поглинальну здатність матеріалу. Можна було б припустити, що за близьких значень довжини хвилі випромінювання твердотільного і волоконного лазерів можуть бути отримані однакові результати, але волоконні лазери мають більш високу якість пучка  $M^2$ , що і дозволило отримати в процесі багатоімпульсного оброблення різні кольори.

Важливою характеристикою оброблення є також інтервал сканування, що визначає від-



стань між лініями оброблення, тобто так званий поділ зображення. На рис. 7,а наведений результат лазерного оброблення під час сканування металевої поверхні з роздільною здатністю 20 ліній/мм. У цьому випадку рисунок кожної лінії створюється незалежно від інших і підсумкове зображення формується послідовно, тобто лінія за лінією. Для створення плівки однорідного кольору товщина лінії повинна варіюватися в межах від 20 до 50 мкм. На цьому зображенні, отриманому за допомогою сканувального електронного мікроскопа, між лініями сканування можна побачити поверхню вихідного матеріалу, однак неозброєним оком вона непомітна.

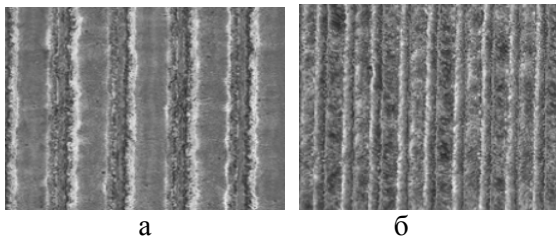


Рис. 7. Лазерне кольорове маркування з поділом 20 (а) і 30 ліній/мм (б)

Під час лазерного оброблення можливий такий режим сканування, за яким відбуватиметься перекриття ліній руху пучка лазера (рис. 7, б). У цьому випадку поділ складає 30 ліній/мм. Оксидний шар формується за рахунок акумуляції енергії сусідніх ліній. Оригінального матеріалу між лініями в цьому випадку не залишається, тому колір обробленої поверхні є більш однорідним, ніж у разі сканування з роздільною здатністю 20 ліній/мм. Однак у випадку використання цього методу крайні лінії в сформованому таким чином зображенні відрізняються за кольором від інших, оскільки кількість одержуваної ними енергії відмінна від кількості енергії, що припадає на решту площі обробленої лазером поверхні.

### Висновки

1. Дослідження продемонстрували, що використання CO<sub>2</sub>-лазера є недоцільним не тільки для створення кольорового маркування, а й для гравірування.
2. Під час проведення експериментів із застосуванням Nd:YAG-лазера було отримано поєднання гравірування з частковим кольоровим контрастом.
3. Твердотільний Nd:YAG-лазер може використовуватися для гравірування на поверхні металу та для отримання монохромних зображень на сувенірній продукції.

4. Повнокольорове лазерне маркування може бути одержано тільки за допомогою волоконного лазера.

5. Колір маркування визначається переважно кількістю імпульсів в точку.

### Література

1. Вейко В. П., Метев С. М. Лазерные технологии в микроэлектронике. София: Изд-во Болг. АН, 1990. 361 с.
2. Горный С. Г., Емельченков И. Р. Лазерная технология и ее применение в металлообработке. Ленинград: ЛДНТП, 1990. С. 42–47.
3. Веденов А. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
4. Emmelmann C.. Introduction to Industrial Laser Materials Processing. Hamburg: Rofin-Sinar 1998. 180 p.
5. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. Москва: Высшая школа, 1988. 159 с.

### References

1. Veyko V. P., Metev S. M. Lazernyie tehnologii v mikro-elektronike [Laser technology in microelectronics], Sofia: Bulgarian Publishing House. AN, 1990, 361 p. (In Russian).
2. Gorniy S. G., Emelchenkov I. R. Laser technology and its application in metal processing]. Leningrad, LDNTP, 1990. Pp. 42–47 (In Russian).
3. Vedenov A. A., Gladush G. G. Fizicheskie protsessy pri lazernoy obrabotke materialov [Physical processes in laser processing of materials], Moscow, Energoatomizdat, 1985. 208 p. (In Russian).
4. Emmelmann C.. Introduction to Industrial Laser Materials Processing. Hamburg: Rofin-Sinar, 1998. 180 p.
5. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. Tehnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki [Laser Processing Technological Processes], Moscow, High school, 1988. 159 p. (In Russian).

**Афанасьєва Ольга Валентинівна**, к.т.н., доцент кафедри фізичних основ електронної техніки, тел.: (+38) 096-525-62-35, e-mail: 7584839@ukr.net, Харківський національний університет радіоелектроніки, пр. Науки, 14, м. Харків, 61166, Україна,

**Лалазарова Наталія Олексіївна**, к. т. н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел.: (+057) 707-37-92, e-mail: [lalaz1932@gmail.com](mailto:lalaz1932@gmail.com), Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, вул. Я. Мудрого, м. Харків, 61002, Україна.

### Technology of laser color marking for steels

**Abstract. Problem.** Color marking of steel was performed while maintaining surface quality with lasers of various types. The basis of the color marking of

metals is the process of formation on the surface of the sample the films of the oxides and nitrides of the material under the influence of laser radiation. The color of the film depends on its chemical composition and thickness. **Goal.** The goal is development of modes of color laser marking of steel with the help of lasers of different types. **Method.** Color marking of corrosion-resistant steel was performed using a CO<sub>2</sub> laser, solid-state and fiber lasers. **Results.** The effect of laser radiation parameters on the surface color was studied. Studies have shown that full-color marking can only be done with a fiber laser. On the basis of preliminary calculations of the temperature-time parameters of radiation and the experiments performed, it is established that the color of the marking is determined mainly by the number of pulses per point. **Scientific novelty.** Modes of color marking of steel with a fiber laser while preserving surface roughness are developed. **Practical significance.** It can be used in microelectronics for marking workpieces, products and equipment at all stages of development and production.

**Key words:** color laser marking, laser engraving, pulse laser radiation, solid solid laser, fiber laser, pulse frequency.

**Afanasieva O.**, PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department, tel. (+38) 096-525-62-35, e-mail: [7584839@ukr.net](mailto:7584839@ukr.net), Kharkiv National University of Radio Electronics, Science Avenue, 14, Kharkiv, 61166, Ukraine.

**Lalazarova N.** PhD, Associate Professor, Department of Technology of Metals and Materials Science, tel. (057) 707-37-92, e-mail: [lalaz1932@gmail.com](mailto:lalaz1932@gmail.com), Kharkiv National Automobile and Highway University, Yaroslava Mudrogo str., 25, Kharkiv, 61002, Ukraine.

### Технология лазерной цветной маркировки сталей

**Аннотация.** Проведена цветная маркировка коррозионно-стойкой стали с помощью лазеров различных типов. В основе цветной маркировки металлов лежит процесс образования на поверхности образца пленок из оксидов обрабатываемого материала под воздействием лазерного излучения. Установлено, что полноцветная маркировка может быть получена только с помощью волоконного лазера. На основе предварительных расчетов температурно-временных параметров излучения и проведенных экспериментов установлено, что цвет маркировки определяется в основном количеством импульсов в точку.

**Ключевые слова:** цветная лазерная маркировка, лазерная гравировка, импульсное лазерное излучение, твердотельный лазер, волоконный лазер, частота следования импульсов.

**Афанасьева Ольга Валентиновна**, к.т.н., доцент кафедры основ электронной техники, тел.: (+38) 096-525-62-35, e-mail: [7584839@ukr.net](mailto:7584839@ukr.net), Харьковский национальный университет радиоэлектроники, пр. Науки, 14, г. Харьков, 61166, Украина.

**Лалазарова Наталия Алексеевна**, к.т.н., доцент кафедры технологии металлов и материаловедения, тел.: (057) 707-37-92, e-mail: [lalaz1932@gmail.com](mailto:lalaz1932@gmail.com), Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ул. Ярослава Мудрого, 25, г. Харьков, 61002, Украина.