

## ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОГО ОЧИЩЕННЯ СТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

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.** Робота присвячена лазерному очищенню сталевих конструкцій від окисних плівок, продуктів корозії, окалини та інших забруднень для отримання необхідної якості поверхні та проведення подальших технологічних операцій. Під дією лазерного випромінювання на окисненій поверхні відбуваються реакції відновлення оксидів та випаровування лако-фарбових забруднень. Розроблені рекомендації з використання імпульсно-періодичного CO<sub>2</sub>-лазера для очищення від іржі та технологічних забруднень сталевих конструкцій у так званих польових умовах.

**Ключові слова:** лазерне очищення, іржа, окалина, абляція, випаровування, теплопровідність, шорсткість.

**Вступ**

Важливе значення для забезпечення надійності та довговічності машин та конструкцій має якість поверхневого шару деталей [1]. Якість залежить від природи самого матеріалу (його складу, структури, наявності дефектів) та впливу зовнішніх чинників (температури, характеру напруженого стану, середовища тощо), технології обробки.

**Аналіз публікацій**

Як правило, усі руйнування деталей починаються з поверхні. Отже, технічне рішення проблеми підвищення надійності та довговічності машин значною мірою обумовлене можливістю технологічного забезпечення якості поверхневого шару деталей, що визначається сукупністю характеристик: шорсткістю поверхні, фізико-механічним станом, мікроструктурою металу поверхневого шару, рівнем залишкових напружень [1, 2].

Очищення поверхні для отримання необхідної якості є однією з базових технологій у багатьох галузях промисловості. Для деяких видів виробництв – зварювального, лакофарбового, гальванічного – очищення поверхні є актуальним питанням, тому що якість поверхні гарантує високий ресурс і надійність роботи різних виробів.

Очищення в загальному вигляді є операцію видалення поверхневих шарів, які утворені будь-якими забрудненнями або покриттями, зокрема іноді основного шару матеріалу.

На сьогодні є досить багато традиційних методів очищення поверхні: механічних, ультразвукових, хімічних, електрохімічних

та ін., що успішно використовуються в промисловості [1, 2, 3].

У процесі свого еволюційного розвитку і вдосконалення традиційні технології очищення поверхні підійшли до потенційної технологічної межі та повною мірою не відповідають постійному зростанню вимог промисловості за технологічними, техніко-економічними, екологічними показниками. Традиційно дефекти поверхневого шару металу, органічні й неорганічні забруднення видаляються фізико-хімічними (знежирення, травлення, активування) та фізико-механічними (шліфування, полірування, ультразвукова та струйно-абразивна обробка) методами [1].

Фізико-хімічні методи, що застосовуються переважно для очищення поверхні від забруднень органічного характеру, мають такі недоліки: низька продуктивність, необхідність застосування спеціалізованого обладнання та витратних матеріалів, неможливість усунення дефектів поверхневих шарів. Слід також пам'ятати, що використання органічних розчинників робить фізико-хімічні методи очищення неекологічними.

Механічна обробка поверхні деталей призначена для очищення поверхні від окисних плівок, окалини, іржі, поверхневих дефектів, неорганічних забруднень (аерозолей, металевих пилю тощо).

Основними способами механічної обробки поверхні є шліфування, полірування, віброобробка, струменева абразивна і гідроабразивна обробка. Недоліком шліфування є те, що воно може спричинити в поверхневому шарі дефекти і мікрodefekти – припалення, подряпини, мікротріщини, у яких можуть

накопичуватися залишки мастильно-охолоджувальної рідини (МОР). Якщо поверхня має складну форму, то проведення шліфування ускладнюється, а для м'яких металів та сплавів взагалі є проблематичним.

Струменеву абразивну і гідроабразивну обробку застосовують зазвичай для видалення з поверхні деталей товстого шару термічної окалини, іржі, грату. Абразивним матеріалом є кварцовий пісок, сталевий дріб, корунд. Вдаряючись об поверхню металу, частинки абразиву збивають забруднення, що міцно прикріпилися до поверхні, надаючи їй матовість і своєрідно розвинений мікро-рельєф.

Добираючи абразив певної твердості й зернистості, склад робочої рідини і режим обробки, можна не тільки очистити поверхню металу від механічних і хімічних забруднень, але і досягти ефективного згладжування поверхні. Слід зазначити, що абразивна обробка є єдиним методом очищення, що може ефективно застосовуватися в польових умовах для очищення сталевих конструкцій. Але утворення великої кількості абразивного пилу потребує застосування відповідного обладнання. Велика кількість робочого матеріалу взагалі незворотно втрачається, що разом із витратами на утилізацію і очищення абразивної речовини робить цей вид очищення недешевим.

Основними недоліками гідроабразивної обробки є потрапляння робочої рідини в мікропори, мікротріщини поверхні, що погіршує експлуатаційні властивості, а також необхідність утилізації гідроабразивної рідини.

Поверхня металу після абразивного і гідроабразивного очищення швидко окислюється і насичується вологою, тому наступна операція фарбування повинна виконуватися через нетривалий час (не більше чотирьох годин).

Альтернативним методом є лазерне очищення [2]. Висока продуктивність лазерного очищення поверхні, що досягає декількох квадратних метрів за годину, висока екологічна безпека, відсутність витратних матеріалів, висока технологічна відтворюваність процесу, а також можливість комплексно вирішувати проблему очищення поверхні, видаляючи одночасно як органічні, так і неорганічні забруднення, відкриває широкі потенційні можливості впровадження цієї технології в різних галузях промисловості.

Основними механізмами лазерного очищення поверхні є випаровування й ударно-

механічний вплив. Історично спочатку використовувалися переважно випарні механізми лазерного очищення поверхні [2], коли щільність потужності випромінювання перевищує значення, за якого починається випаровування забруднювальних речовин з поверхні. У цьому випадку в основі фізики процесу лазерного видалення поверхневих шарів (іржі, окалини, окислів, забруднень, лаків, фарб, жирів та ін.) лежить ефект випаровування, тобто переведення матеріалу з твердої фази в парогазоплазмову, уникаючи утворення рідкої фази.

Для зменшення теплового впливу на поверхневий шар основного матеріалу використовуються довипарні режими лазерного очищення. У цьому випадку очищення поверхні твердого тіла від плівок, так само як і від забруднювальних частинок, проводиться на низькоенергетичних режимах, щоб запобігти руйнуванню поверхневих шарів або виникненню в них небажаних фізичних та хімічних змін. У цих умовах найбільш імовірними фізичними механізмами очищення є ударно-механічні, пов'язані із швидким тепловим розширенням забруднювальних частинок, плівок або поверхневих шарів основного матеріалу в процесі поглинання лазерного випромінювання і виникненням унаслідок цього ударної хвилі в матеріалі (і в повітрі), а також вибуховим видаленням наявних газів та пари, що утворюється.

За необхідності очищення поверхні в області механічних дефектів (подряпини, тріщини та ін.) обробка поверхні в довипарних режимах зазвичай виявляється недостатньою для повного видалення корозійного шару. У цьому випадку, зазвичай, проводять також додаткову локальну обробку поверхні у випарному режимі.

За допомогою лазера можна ефективно видаляти лакофарбові покриття великої товщини і рихлу іржу глибиною до 0,8 мм. Однак усі дослідження, описані раніше, проводилися в стаціонарних умовах з використанням комбінованих лазерних установок [4]. У таких установках додатковим джерелом енергії можуть використовуватися імпульсні або безперервні лазери з різною потужністю і довжиною хвилі.

Очищення від іржі сталевих конструкцій мостів, ЛЕП, башт телевізійних та мобільних передавачів тощо в так званих польових умовах за допомогою лазерів не проводилося.

### Мета і постановка завдання

Метою дослідження є розробка режимів лазерного очищення сталевих конструкцій від іржі та технологічних забруднень, що можуть застосовуватися як в стаціонарних, так і в польових умовах. Для досягнення цієї мети були поставлені такі завдання: 1) дослідити взаємодію лазерного випромінювання з основним металом і забрудненнями та вибрати тип лазера; 2) вивчити вплив параметрів лазерного випромінювання на процес очищення сталі; 3) розробити режими лазерного очищення сталевих конструкцій.

### Розробка технології лазерного очищення сталевих конструкцій

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

Більшість лазерних технологій базується на тепловій дії випромінювання, тобто має на увазі необхідність нагрівання об'єкта впливу до заданої температури. Тому 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 [4, 5].

Змінними параметрами в цій роботі обрано довжину хвилі випромінювання, яка визначається типом лазера, потужність випромінювання та тривалість лазерного впливу, що залежить від тривалості імпульсів, частоти їхнього проходження та швидкості переміщення лазерного випромінювання по поверхні оброблюваного матеріалу.

Найбільш характерним забрудненням для сталевих виробів є іржа (оксид заліза  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Зважаючи на те, що нагрівання металу під час очищення є небажаним, для виконання очищення можна запропонувати використання  $\text{CO}_2$ -лазера, випромінювання якого добре поглинається іржею, і значно гірше – основним металом.

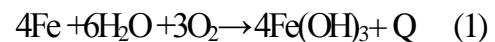
Дослідження проводилися на зразках із вуглецевих сталей марок Ст3, Ст5, сталь 20 з різним ступенем окиснення поверхні.

Для очищення від іржі сталевих конструкцій використовували установку на базі відпаяного  $\text{CO}_2$ -лазера Reci потужністю 130 Вт. Для забезпечення мобільності та зручності

використання установки ручний лазерний сканатор з'єднаний з установкою за допомогою оптичного волокна. Переміщення лазерного пучка можливе як в автоматичному, так і в ручному режимі.

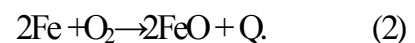
Якість очищення перевірялася візуально за допомогою мікроскопа Sigeta Expert за умови збільшення  $\times 100$ . Ступінь очищення від окалини та іржі визначали за допомогою пластини з прозорого матеріалу із взаємно перпендикулярними лініями, що утворюють квадратики розмірами  $2,5 \times 2,5$  мм, яку пересувають по поверхні виробу [2, 3]. Ступінь очищення є відношенням числа квадратиків, зайнятих окалиною та іржею, до загальної кількості квадратиків, вираженим у відсотках. Більш детально поверхня досліджувалася шляхом вимірювання мікротвердості та шорсткості поверхні. Шорсткість сталевих виробів, призначених для фарбування, повинна бути  $R_z$  40–60 мкм, тому якісним вважається очищення, що забезпечує таку шорсткість за умови ступеня очищення не менше ніж 90 %.

Під дією кисню повітря за наявності водяної пари метал (залізо) окиснюється з утворенням гідроксиду заліза  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ :

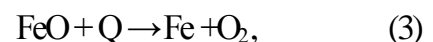


Гідроксид заліза (III) дуже нестійкий, швидко втрачає воду і перетворюється в оксид заліза (III)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Це з'єднання не захищає поверхню заліза від подальшого окиснення. Унаслідок залізний предмет може бути повністю зруйнований.

Цей процес супроводжується виділенням тепла і використовується для підвищення ефективності лазерного різання. У разі нагрівання до  $500\text{--}600$  °С і вище утворюється оксид  $\text{FeO}$  (окалина):



Утворенням окалини супроводжуються процеси термічної обробки і зварювання. Лазерне випромінювання викликає швидкісне нагрівання до температур  $900\text{--}1300$  °С. Під дією лазерного променя на окисненій поверхні відбуваються такі реакції:



Відновлення металу з оксидів потребує значної кількості енергії, джерелом якої в

цьому випадку є лазер. У разі надлишку тепла система «іржа – метал» переходить у стійкіший стан за умови звільнення атомів кисню [4].

Найбільш істотно на процес очищення впливає потужність випромінювання, яка саме визначає кількість тепла, що потрапляє на оброблювану поверхню. Контроль впливу потужності на якість очищення, окрім візуального оцінювання поверхневого шару, проводили вимірюванням мікротвердості та шорсткості.

Обробка поверхні проводилась в імпульсно-періодичному режимі за незмінних умов фокусування, частоти проходження імпульсів 30000 Гц і швидкості сканування 200 мм/с. Зразки мали шар іржі завтовшки 0,6–0,8 мм. Залежність шорсткості поверхні від потужності випромінювання та кількості проходів наведена на рис. 1.

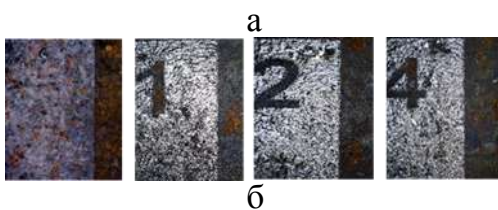
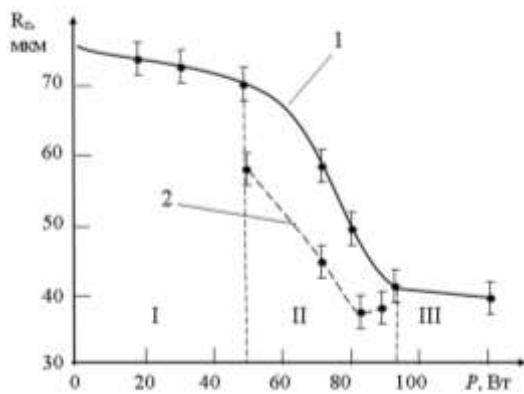


Рис. 1. Графік залежності шорсткості (а) та структури поверхні (б) від потужності випромінювання

Крива 1 характеризує залежність шорсткості поверхні від випромінювання для одного проходження, на ній простежуються три зони. Зона I – характеризується частковим випаровуванням іржі, високою шорсткістю поверхні та відсутністю металізації приповерхневого шару. У зоні II – іржа майже повністю випаровується, шорсткість поверхні зменшується, частково або повністю металізується приповерхневий шар. Для зони III властиві повне випаровування іржі, середня шорсткість поверхні, повна металізація та оплавлення приповерхневого шару.

Дослідження поверхні показали, що потужність випромінювання має суттєвий вплив на якість очищення. У випадку потужності до 50 Вт шорсткість забрудненої поверхні практично не змінюється. Металографічні дослідження показують, що на поверхні іржі спостерігається металізація її верхніх шарів, форма частинок іржі глобулярна, розміри глобул різні. Мікротвердість поверхневого шару зразка із сталі 20 у нормалізованому стані та після металізації поверхні після лазерного очищення становить 1740–2000 МПа. Ці утворення не мають значної адгезії з металом і легко видаляються.

Зі збільшенням потужності металізація поверхні збільшується, а за умови потужності більшої за 95 Вт починається оплавлення поверхні (рис. 1, б).

Якщо потужність випромінювання до 70 Вт – залишаються неметалізовані ділянки, очевидно, що одного проходження для очищення від забруднень завтовшки 0,6–0,8 мм недостатньо.

За умови роботи в декілька, зокрема два проходи, можливе таке розподілення потужності між проходженнями: перший прохід менш потужний, ніж другий; перший прохід більш потужний, ніж другий; проходи мають однакову потужність.

Перший варіант був відкинтий одразу. Обробка за такою схемою сприяла утворенню на поверхні окалини  $FeO$ , яка має дуже високу (до 70 %) відбивну здатність, тому подальша обробка підвищувала енерговитрати.

Обробка однаково потужними проходженнями сприяє оплавленню поверхні вже за умови 75–80 Вт. Варіант обробки, коли потужність другого проходження менша, ніж першого, виявився найбільш результативним.

Крива 2 на рис. 1 характеризує залежність шорсткості поверхні від потужності випромінювання для двох проходів у разі постійної потужності другого у 50 Вт. Найкращий результат був отриманий за умови потужності першого проходження 80 Вт (рис. 2).



Рис. 2. Вигляд (а) та профілограма (б) поверхні сталевго зразка після очищення від іржі у два проходи

Обробка у два проходи сприяє повній металізації поверхні із шорсткістю 33–45 мкм без оплавлення поверхневого шару. Для очищення лакофарбових покриттів потужність може коливатися від 20 Вт до 50 Вт залежно від кількості шарів покриття. Якщо забруднення більш складне або комбіноване з іржею, то слід орієнтуватися на режими для очищення іржі за два проходи.

На якість лазерного очищення істотно впливають умови фокусування лазерного випромінювання – діаметр плями фокусування, фокусна відстань оптичної фокусувальної системи, ступінь поляризації випромінювання, закон розподілу щільності потужності за перетином пучка і зміщення фокальної площини відносно поверхні оброблюваного матеріалу.

Для конкретної лазерної установки можна змінювати положення фокальної площини відносно оброблюваної поверхні і пов'язаний з цим параметром діаметр плями фокусування. Аналізуючи отримані результати очищення для різного положення фокальної площини (рис. 3), можна зробити висновок, що положення фокальної площини над поверхнею (а) та на поверхні (б) є оптимальним положенням для очищення поверхні за допомогою цієї установки.



Рис. 3. Вигляд поверхні сталевго зразка після очищення за різних умов фокусування

У попередніх дослідженнях було показано, що застосування води як допоміжної речовини мало позитивний вплив на якість лазерного очищення. Проведене вологе очищення поверхні показало, що утворення пари води під дією лазерного випромінювання призводить до підвищення енерговитрат і погіршення стану поверхні.

Особливо сильно пари води поглинають хвилі ІЧ-діапазону, а в середній інфрачервоній області інтенсивним поглиначем є вуглекислий газ. Таким чином, попереднє змочування поверхні в процесі очищення від іржі за допомогою CO<sub>2</sub>-лазера не доцільне.

Країна несе величезні матеріальні втрати через корозію мостових і морських конструкцій, опор контактної мережі і ЛЕП, віадуків,

шляхопроводів та інших конструкцій. Корозія призводить до зменшення надійності роботи обладнання.

Корозія сильно скорочує термін експлуатації металевих виробів і тим самим наносить значну шкоду економіці країни. Щорічно через корозію остаточно втрачається 10...12 % чорних металів. Запропонована технологія лазерного очищення сталевих конструкцій мостів, ЛЕП, башт телевізійних та мобільних передавачів тощо в польових умовах дозволяє отримати необхідну якість поверхневого шару навіть у випадку нерівномірного корозійного впливу та зменшити втрати сталі в процесі обробки у два проходи за рахунок повної металізації поверхні (з продуктами корозії у вигляді іржі) без оплавлення поверхневого шару.

### Висновки

1. Розроблено режими лазерного очищення сталевих конструкцій від іржі. Найкращим результатом, рекомендованим для використання, є режим з потужністю на першому проході 80 Вт, на другому – 60 % від початкової потужності. Цей режим забезпечує максимальне очищення, шорсткість поверхні на вихідному рівні та мінімальне оплавлення приповерхневого шару.

2. Досліджені умови фокусування випромінювання, рекомендовано фокусувати випромінювання на поверхні або над поверхнею оброблюваного виробу.

3. Отримані результати можуть бути використані для очищення сталевих поверхонь від іржі та різних технологічних забруднень у польових умовах та на виробництві.

### Література

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника. Москва: Машиностроение, 1985. 424 с.
2. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / Вейко В. П., Смирнов В. Н., Чирков А.М., Шахно Е.А. Санкт-Петербург: НИУ ИПМО, 2013. 103 с.
3. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. Москва: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
4. Веденов А.А., Гладуш Г.Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. Москва: Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
5. Панченко В. Я., Голубев В. С., Васильцов В.В. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. Москва: Физматлит, 2009. 663 с.

## References

1. Garkunov D. N. *Tribotekhnika* [Tribotechnics]. Moscow, Mechanical Engineering, 1985, 424 p. [In Russian].
2. Veiko V. P., Smirnov V. N., Chirkov A. M., Shakhno E. A. *Lazernaya ochistka v mashinostroenii i priborostroenii* [Laser cleaning in mechanical engineering and instrument making], St. Petersburg: NRUITMO, 2013, 103 p. [In Russian].
3. Grigoryants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I.; Pod red. Grigoryantsa A. G. *Tehnologicheskie protsessy lazernoy obrabotki* [Laser Processing Technological Processes], Moscow, Publishing house of MSTU named after N.E. Bauman, 2006, 664 p. [In Russian].
4. 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].
5. Panchenko V. Ya., Golubev V. S., Vasiltsov V. V. *Laser technologies for processing materials: modern problems of fundamental research and applied developments*. Moscow, Fizmatlit, 2009. 663 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, 14, пр. Науки, 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, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, вул. Ярослава Мудрого, м. Харків, 61002, Україна.

## Technology of laser cleaning of steel structures

**Abstract. Problem.** Cleaning metal surfaces from oxide films, corrosion products, scale and other contaminants to obtain the required quality is one of the basic technologies in many industries. There are traditional methods of cleaning, which in the process of their evolutionary development and improvement have approached the potential technological frontier and do not fully meet the ever-growing demands of the industry. An alternative method is laser cleaning. **Goal.** The aim is development of modes for laser cleaning of steel structures from rust and technological contamination, which can be used both in stationary and field conditions. **Method.** To clean the steel structures, we used an installation based on a pulse-periodic CO<sub>2</sub> laser with a power of 130 W. To assess the quality of the surface layer, the microhardness method and roughness measurement were used. **Results.** Under the action of laser radiation on the oxidized surface, reactions of reduction of oxides and evaporation of paint and varnish contaminants occur. The influence of the radiation power and the number of passes during cleaning on the surface quality, which was evaluated by the degree of metal-

lization and roughness, was investigated. **Scientific novelty.** It was determined that the position of the focal plane above the surface and on the surface is the optimal position of the laser radiation for cleaning. It was found that the microhardness of the surface layer of steel after normalization and after metallization of the surface in the process of laser cleaning is practically the same. It is shown that preliminary wetting of the surface during cleaning from rust using a CO<sub>2</sub> laser is not advisable. Water vapor is especially strong in absorbing waves in the infrared range, and carbon dioxide is an intense absorber in the mid-infrared range. **Practical significance.** Recommendations have been developed for the use of a repetitively pulsed CO<sub>2</sub> laser for cleaning the steel structures of bridges, power lines, towers of television and mobile transmitters from rust and technological contamination in field conditions. **Key words:** laser cleaning, rust, scale, ablation, evaporation, thermal conductivity, roughness.

**Afanasieva O.**, PhD, Associate Professor, Physical Foundations of Electronic Engineering Department, tel. (+38) 096-525-62-35, e-mail: 7584839@ukr.net, 14, Science Avenue, Kharkiv National University of Radio Electronics, 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, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25, Yaroslava Mudrogo str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

## Технология лазерной очистки стальных конструкций

**Аннотация.** Работа посвящена лазерной очистке стальных конструкций от оксидных пленок, продуктов коррозии, окислины и других загрязнений для получения необходимого качества поверхности и проведения дальнейших технологических операций. Под действием лазерного излучения на окисленной поверхности происходят реакции восстановления оксидов и испарения лакокрасочных загрязнений. Разработаны рекомендации по использованию импульсно-периодического CO<sub>2</sub>-лазера для очистки от ржавчины и технологических загрязнений стальных конструкций в так называемых полевых условиях.

**Ключевые слова:** лазерная очистка, ржавчина, окислина, абляция, испарение, теплопроводность, шероховатость.

**Афанасьєва Ольга Валентиновна**, к.т.н., доцент кафедри основ електронної техніки, тел. (+38) 096-525-62-35, e-mail: 7584839@ukr.net, Харківський національний університет радіоелектроніки, 14, пр. Науки, м. Харків, 61166, Україна.  
**Лалазарова Наталія Алексєєвна**, к.т.н., доцент кафедри технології металів та матеріалознавства, тел. (057) 707-37-92, e-mail: lalaz1932@gmail.com, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, 25, ул. Ярослава Мудрого, г. Харьков, 61002, Україна.