

УДК 621.375.826

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ПРИ ВЗАЄМОДІЇ ЛАЗЕРНОГО CO_2 -ВИПРОМІНЮВАННЯ З МАТЕРІАЛОМ

О. М. Савченко

Українська академія друкарства,
вул. Під Голоском, 19, Львів, 79020, Україна

Відображено фізичну сутність процесу дії лазерного CO_2 -випромінювання на матеріал. Наведено структурну схему лазерної системи та описано складові компоненти лазера. Здійснено класифікацію типів лазерів, що різняться між собою активними середовищами, потужностями та режимами роботи. Фізичні процеси, що виникають при взаємодії лазерного променя з матеріалом, наведено у вигляді схем. Досліджено характер і результат взаємодії цих процесів. Проаналізовано чотири стадії при взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом: поглинання і нагрівання, плавлення, випаровування, утворення плазми. Наведено діапазони зміни щільності потужності лазерного випромінювання залежно від процесу обробки. Подано області з різними режимами взаємодії і відзначено їхні можливі застосування. Виявлено основні параметри лазерного випромінювання CO_2 -лазера на процес гравіювання та розрізування матеріалів.

Ключові слова: лазерні технології, фізичні процеси, CO_2 -лазер, параметри лазера, поліграфічні матеріали.

Постановка проблеми. Протягом останніх років і дотепер технологія лазерної обробки матеріалів інтенсивно розвивається, а питання лазерного розрізування та гравіювання різноманітних матеріалів — дерев'яних (дерево, фанера, шпон, МДФ, коркове дерево), полімерних (полівінілхлорид, поліпропілен, полістирол, акрил, пінопласт, поролон, ізолон, поліаміди, поліефіри, фторопласти та ін.), текстильних і нетканних матеріалів (натуральна та штучна шкіра, замша, фетр), скла і металів, паперу і картону різного призначення (гофро-, піно-, крафт-, електро-, дизайнерський та ін.) є предметом постійної уваги як науковців, так і практиків [1–3].

Завдання оптимізації лазерної обробки матеріалів значною мірою визначають фізичні процеси, які відбуваються в матеріалі, оскільки класифікація лазера за фізичними особливостями активного середовища є найбільш поширеною. Виявлення характеру теплофізичних процесів дасть змогу здійснити розподіл енергії лазерного випромінювання, що підвищить ефективність роботи устаткування та якість продукції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Виконані дослідження з цієї тематики присвячені застосуванню лазерного гравіювання для виготовлення печаток та штампів із використанням фотополімерних матеріалів із метою захисту від підроблення у відбитках [4]. Автор [5] проаналізував і систематизував динаміку

росту лазерних технологій у різноманітних секторах. Класифікацію застосування лазерного випромінювання в поліграфічному видавництві та виробництві, а також класифікацію застосування лазерної обробки різних поліграфічних матеріалів розробили автори [6]. Взаємодія лазерного випромінювання з речовиною, поверхнєве лазерне зміцнення сталей, лазерне маркування металів і неметалів, лазерне очищення металів перед проведенням різноманітних технологічних операцій наведено в праці [1]. Основні фактори та режими проведення процесу лазерного гравіювання та розрізування пластикових матеріалів під час виготовлення поліграфічної продукції виявлено в публікаціях [7, 8].

Прогрес цього напрямку ґрунтується на подальшому вдосконаленні характеристик лазерного випромінювання в розширенні області довжин хвиль випромінювання, підвищенні стабільності частоти випромінювання, зростанні інтенсивності імпульсного випромінювання, підвищенні ККД, просторової когерентності та ін.

Мета статті — дослідити фізичні процеси, які відбуваються у матеріалі під дією лазерного CO_2 -випромінювання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Слово «лазер» (з англ. «laser» — Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) відображає фізичну сутність процесу генерації лазерного випромінювання — посилення світла за допомогою вимушеного випромінювання. Отже, лазерне випромінювання — це різновид електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, яке, маючи низку унікальних фізичних властивостей, а саме: високу монохроматичність і когерентність, низьку розбіжність випромінювання та високі питомі енергетичні характеристики, дає змогу створити перспективний вид висококонцентрованого джерела енергії, який знайшов широке застосування в різних галузях науки і техніки, промисловості та приладобудуванні [1].

Лазер складається з трьох основних компонентів (рис. 1):

- 1) активне середовище (лазерний активний елемент), в якому створюється стан лазерного середовища;
- 2) система накачування (пристрій для створення інверсії в активному середовищі);
- 3) оптичний резонатор (пристрій, що випромінює у простір напрямлені фотони і формує на виході світловий пучок) [3].

Сьогодні існує багато лазерів, що різняться між собою активними середовищами, потужностями, режимами роботи та іншими характеристиками. Перспективними, з погляду підвищення зазначених вище характеристик, є:

- твердотільні лазери (ТТЛ) з накачуванням напівпровідниковими лазерами (НПЛ);
- газові ІЧ-лазери високої і середньої потужності;
- волоконні і напівпровідникові лазери;
- фемтосекундні лазери, що забезпечують ультракороткі імпульси і ультрависокі інтенсивності;
- рентгенівські і ВУФ-лазери (область вакуумного ультрафіолету);
- ВУФ-ексимерні лазери;
- хімічні лазери на основі фотонно-розгалуженої реакції в двофазному середовищі [9].

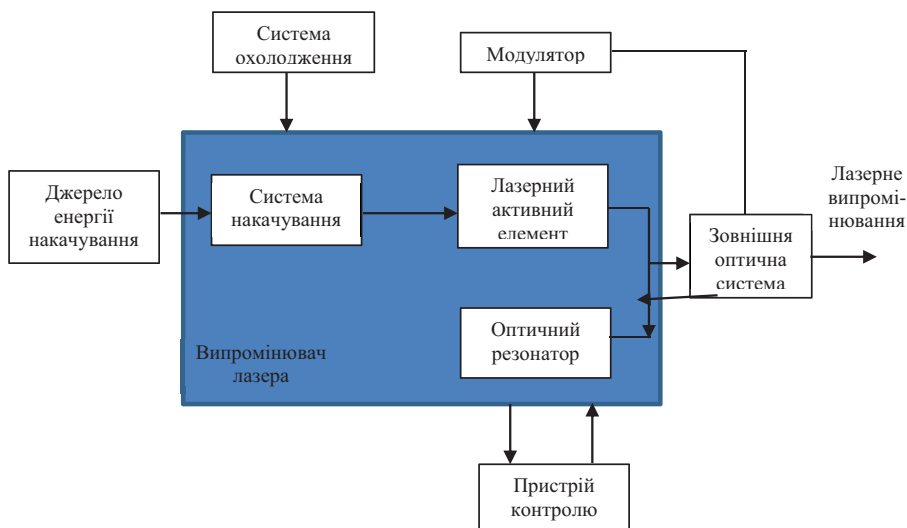


Рис. 1. Структурна схема лазерної системи

Для лазерного розрізування та гравіювання поліграфічної продукції найпоширенішими є CO_2 -лазери із довжиною хвилі 10,64 мкм та Nd:YAG-лазери — 1,064 мкм. Тому дослідження фізичних процесів здійснювалося з використанням вуглекислотного лазера CO_2 безперервної дії на станку TS1390.

Під дією лазерного випромінювання певної довжини хвилі та енергії в матеріалі відбуваються локальні зміни структури і властивостей, пов'язані з руйнуванням або зміною структури мономерів в області теплової дії. Фізичні процеси, що виникають при взаємодії лазерного променя з матеріалом, можна навести у вигляді схеми (рис. 2).

Характер цих процесів, а отже, і результат взаємодії залежать від коефіцієнта поглинання матеріалу на довжині хвилі випромінювання лазера, його пікової потужності і тривалості дії на матеріал. Тепло, яке виділяється, за допомогою теплопровідності проникає в глибину матеріалу (рис. 2, а). Після того як температура поверхні досягає точки плавлення, починається поширення границі рідкої фази в глибину матеріалу (рис. 2, б). Подальше випромінювання призводить до процесу випаровування поверхні (рис. 2, в), що супроводжується іонізацією поверхневих домішок і забруднень, які практично завжди є в тому чи іншому вигляді.

Якщо інтенсивність недостатньо висока, матеріал плавиться, випаровується, а пари — іонізуються. Водночас тиск парів сприяє вихлюпуванню розплаву, і в матеріалі поступово формується отвір. Якщо інтенсивність випромінювання надто велика, то внаслідок випаровування утворюється високотемпературна непрозора плазма. Новоутворена плазма може поширюватися назустріч лазерному пучку в формі хвилі поглинання, яку індукує лазер. Хмара плазми поглинає падаюче лазерне випромінювання й екранує поверхню зразка, перешкоджаючи водночас подальшій дії лазера на матеріал (рис. 2, г). Це негативний ефект, якого потрібно уникати в процесі лазерної обробки матеріалів.

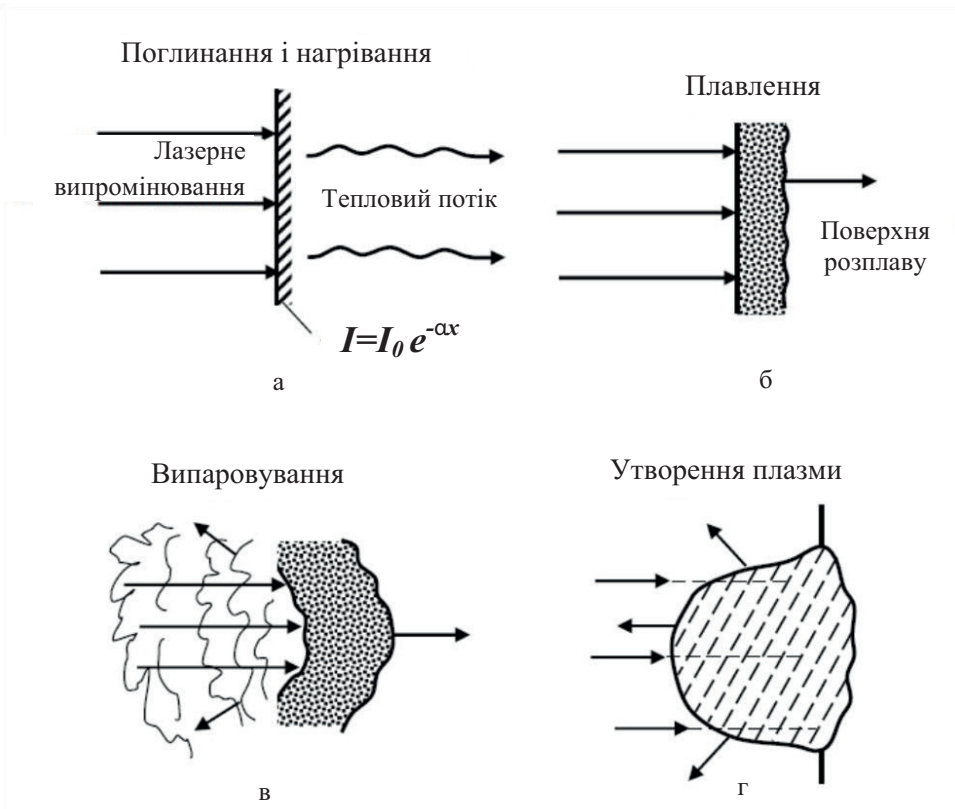


Рис. 2. Фізичні процеси, які відбуваються під дією потужного лазерного пучка на поглинаючу поверхню

У табл. 1 наведено діапазон зміни щільності потужності лазерного випромінювання залежно від процесу обробки. Відповідні значення наводяться для спектральних ділянок — видимої і ближньої інфрачервоної областей, а також для області генерації CO_2 -лазера (~ 10 мкм). За відносно невисоких значень щільності потужності випромінювання переважає плавлення. Під час дії підвищеної щільності потужності випромінювання починається процес випаровування, що не спричиняє взаємодії між падаючим пучком і матеріалом, який випаровується.

За подальшого підвищення щільності потужності випромінювання виникають індуковані хвилі поглинання, які мають провідний вплив на фізичні процеси тоді, коли випаровування знижується. Для CO_2 -лазерів поріг виникнення хвиль поглинання приблизно на порядок нижчий, ніж для твердотільних і волоконних лазерів, що працюють у більш короткохвильовій частині оптичного спектра.

За дуже високих значень щільності потужності випромінювання починається поглинання лазерного випромінювання в індукованій ним плазмі внаслідок зворотного гальмівного ефекту або колективних процесів, які відбуваються в плазмі.

Таблиця 1

Діапазони щільності потужності лазерного випромінювання між падаючим пучком і матеріалом, який випаровується

| Процес | Щільність потужності, Вт/см ² | |
|-------------------------------------|--|--------------------------------------|
| | Видима і ближня ІЧ-області | CO ₂ -лазер |
| Плавлення | ~ 10 ⁵ | ~ 10 ⁵ |
| Випаровування | 10 ⁶ -1,5·10 ⁸ | 10 ⁶ -2,5·10 ⁷ |
| Індукована хвиля поглинання | > 1,5·10 ⁸ | > 2,5·10 ⁷ |
| Зворотний гальмівний ефект у плазмі | < 10 ¹² | - |
| Колективні ефекти в плазмі | ≥ 10 ¹³ | - |

На рис. 3 наведено приблизні області з різними режимами взаємодії і відзначено їхні можливі застосування. Найбільший інтерес становить область, яка розташована нижче від порога виникнення хвилі поглинання. У ній енергія лазерного випромінювання витрачається на зміну стану оброблюваного матеріалу, тоді як в області вище, ніж поріг, енергія переважно йде на підтримання індукованої хвилі поглинання та інших плазмових явищ [1–3].

Отже, під час побудови будь-якого технологічного процесу для лазерної обробки необхідно враховувати теплофізику лазерного нагрівання.

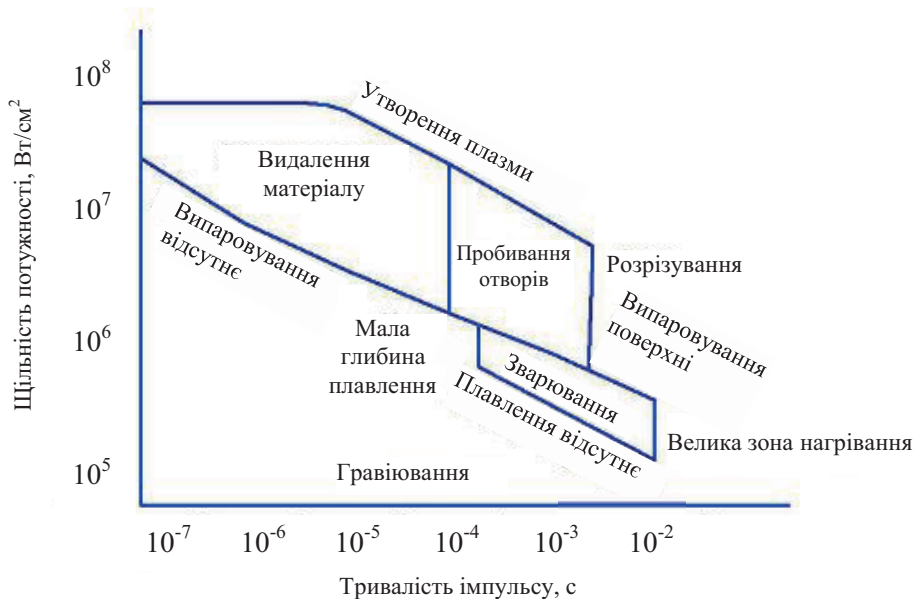


Рис. 3. Діапазони щільності потужності і тривалості імпульсів лазерного випромінювання, придатні для різних процесів обробки матеріалів

Більшість лазерних технологій заснована на тепловій дії випромінювання, тобто передбачається необхідність нагрівання матеріалу до заданої температури. Тому головною характеристикою лазера, що використовується в таких технологіях, є його потужність. Для імпульсних лазерів розглядають потужність в імпульсі і середню потужність, яка залежить від тривалості та частоти проходження імпульсів. Вибір лазера для проведення певного виду обробки визначає специфіка дії лазерного випромінювання на цей матеріал і особливості поставленого технологічного завдання. Основними параметрами, що характеризують лазерне випромінювання, є потужність, довжина хвилі, тривалість дії випромінювання, енергія і частота проходження імпульсів, а також когерентність, спрямованість, монохроматичність та поляризація випромінювання [1].

Висновки. Схематично наведено фізичні процеси, що виникають під час взаємодії лазерного променя з матеріалом. Виявлено, що під дією лазерного випромінювання певної довжини хвилі й енергії в матеріалі відбуваються локальні зміни структури та властивостей, пов'язані з руйнуванням або зміною структури мономерів в області теплової дії. Наведено основні параметри лазерного випромінювання CO₂-лазера на процес гравіювання та розрізування матеріалів. Виявлення характеру теплофізичних процесів дає змогу оптимізувати розподіл енергії CO₂-випромінювання в матеріалі, підвищивши ефективність роботи устаткування та якість продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Федоренко Є. П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів. Харків : ФОП Панов А. М., 2020. 100 с.
2. Елохин В. А., Жданов И. Г. Методы модуляции излучения CO₂-лазеров. *Научное приборостроение*. 2003. Т. 13. № 3. С. 46–51.
3. Гринчишин Т. М., Кіт Г. В. Застосування оптичних лазерних систем та перспективи їх подальшого розвитку. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Інформаційні системи та мережі*. 2014. № 805. С. 96–105. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2014_805_13 (дата звернення: 17.08.2020).
4. Маїк В. З., Харів М. С., Кочубей В. В. Дослідження термічних процесів лазерного гравіювання полімерних шарів трафаретних друкарських форм. *Наукові записки [Української академії друкарства]*. 2016. № 2. С. 22–27. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nz_2016_2_4 (дата звернення: 15.08.2020).
5. Савченко О. М. Аналітичні дослідження сфери використання лазерних технологій. *Квалілогія книги*. 2019. № 1 (35). С. 76–83.
6. Киричок Т. Ю., Діптан К. О. Лазерна обробка поліграфічних матеріалів. *Вісник ЖДТУ*. № 1 (56). С. 11–17. URL: <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/5257> (дата звернення: 15.08.2020).
7. Савченко О. М., Дробот М. В. Дослідження впливу параметрів випромінювання CO₂-лазера на процес лазерної обробки поліграфічної продукції. *Квалілогія книги*. 2020. № 1 (37). С. 54–61.
8. Савченко О. М. Дослідження процесу лазерного розрізування пластикових матеріалів при виготовленні поліграфічної продукції : тези доп. науково-технічної конференції

професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів. Львів : УАД. 19 лютого 2020. С. 36.

9. Перспективные типы технологических лазеров / Прудников Н. В., Кузнецов В. В., Егorenков В. М., Паршиков Б. Ю., Стукало Ю. Е., Яковлева П. Д. Технологии и материалы для экстремальных условий (лазерные технологии, источники тока и материалы) : материалы 12-й Всерос. конф. (Туапсе, 11–15 сентября 2017 г.). Москва : МЦАИ РАН, 2017. С. 6–15.

REFERENCES

1. Afanasieva, O. V., Lalazarova, N. O., & Fedorenko, Ye. P. (2020). Lazerna poverkhneva obrobka materialiv. Kharkiv : FOP Panov A. M. (in Ukrainian).
2. Elohin, V. A., & Zhdanov, I. G. (2003). Metody moduljacji izluchenija SO₂-lazerov: Nauchnoe priborostroenie, 13, 3, 46–51 (in Russian).
3. Hrynychshyn, T. M., & Kit, H. V. (2014). Zastosuvannia optychnykh lazernykh system ta perspektyvy yikh podalshoho rozvytku: Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika». Informatsiini systemy ta merezhi, 805, 96–105. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULRISM_2014_805_13 (data zvernennia: 17.08.2020) (in Ukrainian).
4. Maik, V. Z., Khariv, M. S., & Kochubei, V. V. (2016). Doslidzhennia termichnykh protsesiv lazernoho hraviiuvannia polimernykh shariv trafaretnykh drukarskykh form: Naukovi zapysky [Ukrainskoi akademii drukarstva], 2, 22–27. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nz_2016_2_4 (data zvernennia: 15.08.2020) (in Ukrainian).
5. Savchenko, O. M. (2019). Analitychni doslidzhennia sfery vykorystannia lazernykh tekhnolohii: Kvalilohiia knyhy, 1 (35), 76–83 (in Ukrainian).
6. Kyrychok, T. Yu., & Diptan, K. O. Lazerna obrobka polihrafichnykh materialiv: Visnyk ZhDTU, 1 (56), 11–17. Retrieved from <http://eztuir.ztu.edu.ua/123456789/5257> (data zvernennia: 15.08.2020) (in Ukrainian).
7. Savchenko, O. M., Drobot, M. V. (2020). Doslidzhennia vplyvu parametriv vyprominiuvannia SO₂-lazera na protses lazernoi obrobky polihrafichnoi produktsii: Kvalilohiia knyhy, 1 (37), 54–61 (in Ukrainian).
8. Savchenko, O. M. (19 liutoho 2020). Doslidzhennia protsesu lazernoho rozrizuvannia plastykovykh materialiv pry vyhotovlenni polihrafichnoi produktsii : tezy dop. naukovo-tekhnichnoi konferentsii profesorsko-vykladatskoho skladu, naukovykh pratsivnykiv i aspirantiv. Lviv : UAD, 36 (in Ukrainian).
9. Prudnikov, N. V., Kuznecov, V. V., Egorenkov, V. M., Parshikov, B. Ju., Stukalo, Ju. E., & Yakovleva, P. D. (2017). Perspektivnye typy tehnologicheskikh lazerov: Tehnologii i materialy dlja jekstremal'nykh uslovij (lazernye tehnologii, istochniki toka i materialy) : materialy 12-j Vseros. konf. (Tuapse, 11–15 sentjabrja 2017 g.). Moskva : MCAI RAN, 6–15 (in Russian).

PHYSICAL PROCESSES AT THE INTERACTION OF LASER CO₂ RADIATION WITH THE MATERIAL

O. M. Savchenko

*Ukrainian Academy of Printing,
19, Pid Holoskom St., Lviv, 79020, Ukraine
solia0611@gmail.com*

The physical essence of the process of action of laser CO₂ radiation on the material is reflected. The structural scheme of the laser system is given and the constituent components of the laser are described. The classification of types of lasers which differ among themselves in active environments, capacities and operating modes is carried out. The study of physical processes was performed on a carbon dioxide CO₂ laser machine of continuous action TS1390. It is found that under the action of laser radiation of a certain wavelength and energy on the material there are local changes in the structure and properties associated with the destruction or change in the structure of monomers in the thermal field. The physical processes that occur during the interaction of the laser beam with the material are presented in the form of diagrams. The nature and result of interaction of these processes are studied. Four stages in the interaction of laser radiation with the material are analysed: absorption and heating, melting, evaporation, plasma formation. Ranges of change of density of power of laser radiation depending on process of processing are presented. Areas with different modes of interaction are given and their possible applications are noted. Appropriate values are given for the spectral regions: the visible and near-infrared regions, as well as for the region of CO₂ laser generation (~ 10 μm). It is found that the area of interest is located below the threshold of the absorption wave. The main parameters of CO₂ laser radiation for the process of engraving and cutting materials are presented, namely, power, wavelength, duration of radiation, energy and frequency of pulses, as well as coherence, directionality, monochromaticity and polarization of radiation. Identifying the nature of thermophysical processes allows one to optimize the energy distribution of CO₂ radiation in the material, increasing the efficiency of equipment and product quality.

Keywords: *laser technologies, physical processes, CO₂ laser, laser parameters, printing materials.*

Стаття надійшла до редакції 04.09.2020.

Received 04.09.2020.