

УДК 621.375.826

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ CO₂-ЛАЗЕРА НА ПРОЦЕС ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ

О. М. Савченко, М. В. Дробот

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

Проаналізовано механізми поглинання енергії лазерного випромінювання прозорими і непрозорими матеріалами. Виділено три термічні моделі, які описують взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом, де процес лазерної обробки відбувається довгими, короткими і надкороткими імпульсами. Описано закон Бугера-Ламберта для прозорих матеріалів. Проведено експериментальні дослідження з використанням вуглекислотного CO₂-лазера безперервної дії на станку TS 1390 потужністю 100 Вт. Виявлено основні фактори та режими проведення процесу лазерного гравіювання та розрізування: параметри лазера, режими обробки, параметри матеріалу-заготовки та машинні параметри. Досліджено залежність потужності лазера TS 1390 при його включенні від часу. Виявлено вплив товщини матеріалу на швидкість розрізування. Графічно подано залежність діаметра лазерного променя від фокального діаметра, який залежить від фокусної відстані використовуваної фокусної лінзи. Експериментально підтверджено, що швидкість і якість розрізування можуть суттєво змінюватися залежно від зміни напрямку переміщення оптичного пристрою для розрізування фігурних деталей. Графічно показано положення фокуса, яке впливає на результат лазерної обробки, і залежить від товщини матеріалу, призначеного для розрізування, та може розташовуватися над поверхнею аркуша, на поверхні та зміщуватися в глибину. Досліджено, що властивості оброблюваних матеріалів (поглинаюча здатність, теплопровідність, відбиваюча здатність та ін.) визначають можливість розрізування лазерним променем і залежать від складових їх компонентів та домішок.

Ключові слова: CO₂-лазер, лазерне розрізування і гравіювання, параметри лазера, поліграфічні матеріали.

Постановка проблеми. Із впровадженням новітніх і прогресивних технологій та обладнання на підприємствах виникає безліч завдань із підвищення якості продукції. При постійному і швидкому розвитку лазерне розрізування і гравіювання паперових та полімерних матеріалів (папір, картон, акрил, полістирол, полікарбонати та ін.) стало невід'ємним процесом в поліграфічній галузі (виготовлення палітурок, обкладинок, друкарських форм, штампів і печаток, листівок, візиток та ін.), у виробництві зовнішньої реклами, POS-матеріалів, сувенірної продукції, художньо-прикладному мистецтві (створення макетів). З появою лазерних технологій

стали доступними технології суміщення і компоновання під час виготовлення різноманітної продукції. Потрібно зазначити, що при невеликих накладках виготовлення поліграфічної продукції методом лазерного розрізування та гравіювання є економічно вигідним, тому дослідження параметрів випромінювання CO₂-лазера залишаються актуальними [1–4].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Різноманітність матеріалів для обробки лазерним випромінюванням з погляду підбору довжини хвилі обумовлена їх здатністю як поглинати випромінювання, так і повністю його пропускати. Завдяки можливості фокусування випромінювання в крапку малого розміру великої концентрації енергії дає змогу зменшити оброблювану зону при лазерній обробці матеріалів і, відповідно, покращити якість різки чи гравіюваного шару, однак вплив товщини матеріалу при розрізуванні залишається досить важливим фактором [5].

Принципи лазерної обробки і механізми, що пояснюють сутність процесу та взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом, продовжують вивчатись [6, 7], проте немає загальної систематизації підбору параметрів і пояснення того, що відбувається всередині матеріалу залежно від тих чи інших режимів. Узагальнення і рекомендації під час роботи з різними матеріалами необхідні для спрощення процесу при виготовленні різноманітної поліграфічної продукції.

Мета статті — провести дослідження параметрів лазерного випромінювання CO₂-лазера на процес лазерного розрізування та гравіювання поліграфічних матеріалів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для лазерного розрізування та гравіювання в поліграфічній промисловості можуть використовуватись як прозорі, так і непрозорі матеріали. Згідно з уявленнями, сформованими сьогодні, локальна лазерна модифікація прозорих твердих тіл може бути викликана різними механізмами поглинання енергії лазерного випромінювання. Серед них виокремлюють так звані власні механізми [8], пов'язані з властивостями самої матриці (ударна і багатофотонна іонізація), які можливі тільки при дії надкоротких імпульсів; і механізми, обумовлені поглинаючими дефектами (термопружний, фотоіонізаційний та ін.), які реалізуються в області довгих імпульсів. Реалізація того чи іншого механізму руйнування (термічного/нетермічного) залежить від великої кількості факторів: чистоти досліджуваних зразків, довжини хвилі випромінювання, тривалості лазерного імпульсу, частоти проходження імпульсів, параметрів фокусування та ін.

Однак часто реалізуються обидва механізми, відрізняючись ступенями їх впливу на результат процесу. У зв'язку з цим для з'ясування домінуючого механізму руйнування для кожного конкретного випадку обробки матеріалу бажано мати можливість швидкої зміни величин зазначених параметрів випромінювання та фокусування від мілі- до фемтосекунд.

Сьогодні найбільшого застосування набули лазери з короткою тривалістю імпульсу випромінювання (від наносекундного діапазону і нижче), тому дослідження здійснювались з використанням вуглекислотного CO₂-лазера безперервної дії на станку TS 1390 потужністю 100 Вт, де враховувались саме ці тривалості імпульсу.

Аналізуючи літературні джерела [9], можна виділити три термічні моделі, які описують взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом.

Модель 1. Довгі імпульси, які можна порівняти з часом релаксації (менше 1 мс). Для неї характерні фототермічна абляція (тепло поширюється завдяки теплопровідності) і випаровування матеріалу при кипінні після первинного розплавлення. Однак така термічна дія може спричинити руйнування матеріалу. До нетермічної дії належать механічні напруження і фотохімічна абляція, тобто в деяких випадках енергія фотона буває достатньою для прямого руйнування хімічних зв'язків без введення тепла.

Модель 2. Більш короткі імпульси з тепловою рівновагою ще зберігаються, але втрата тепла спрямована на випаровування (менше 1 нс). При такій дії відбувається нагрівання, що описується квадратичною функцією, і охолодження, що описується логарифмічною функцією. Деякі кроки всередині опису цієї функції викликані прихованими тепловими ефектами. Сам процес обробки наносекундними імпульсами базується на утворенні в його процесі плазми, в результаті чого відбувається поступове формування ударного кратера.

Модель 3. Надкороткі імпульси, які є незначними порівняно з часом релаксації структури. Така дія призводить до нетеплової рівноваги з електронами і решіткою, які мають різну температуру, з прямим випаровуванням і кулоновским ефектом (менше 1 пс). Суть процесу полягає у видаленні матеріалу без значного нагрівання довколишніх областей. У цьому випадку відсутні термічні концепції. Тому кожна модель має свої закономірності, які необхідно враховувати при обробці матеріалів.

Якщо йдеться про безпосередню взаємодію з поглинаючим середовищем, то світловий потік частково відбивається від поверхні, а частково проникає всередину матеріалу, розсіюючись в ньому. Зміна щільності світлового потоку I , тобто кількості світлової енергії, що припадає на одиницю поверхні матеріалу в одиницю часу в поглинаючому середовищі, описується законом Бугера-Ламберта:

$$I = I_0 e^{-\alpha x},$$

де I — інтенсивність світла на глибині x матеріалу; I_0 — інтенсивність світла на поверхні; α — показник поглинання.

Значення величини α , а також механізми поглинання світла і переходу його в тепло різні для різних матеріалів. Значення коефіцієнтів відбивання і поглинання залежать від довжини хвилі випромінювання. Використовуючи цю формулу, можна теоретично перевірити рівень енергії, яка подається на задану глибину матеріалу, що є невід'ємною частиною при плануванні експериментів і безпосередньому їх проведенні.

З огляду на експериментальні дослідження при лазерній обробці матеріалу найбільш вагомими є такі фактори та режими: параметри лазера, режими обробки, параметри матеріалу-заготовки та машинні параметри.

До параметрів лазера належать:

- потужність лазера;
- частота проходження імпульсів;
- розподіл питомої потужності;

- стабільність потужності, поперечний переріз променя;
- розбіжність;
- поляризація.

Режими обробки містять:

- швидкість гравіювання чи розрізування;
- вид газу;
- тиск газу;
- положення фокуса.

До параметрів матеріалу-заготовки можна зарахувати:

- вид матеріалу;
- товщину матеріалу;
- геометрію заготовки;
- поверхню заготовки.

Машинні параметри визначаються:

- дзеркалом для виведення енергії лазерного агрегату;
- положенням променя;
- астигматизмом;
- дзеркалом відхилення;
- фокусною лінзою;
- регулюванням лазерного променя щодо сопла;
- отвором сопла.

Використовувана потужність лазера залежить від виду матеріалу, його товщини та необхідних результатів обробки. Для досягнення високої точності при складній геометрії заготовки або гравіювання тонких ліній необхідно зменшити потужність лазера, переходячи на імпульсний режим.

Важливе значення має і стабільність потужності лазера протягом всього часу гравіювання чи розрізування. На рис. 1 наведено графік залежності потужності від часу при включенні лазера TS 1390 з максимальною потужністю 100 Вт.

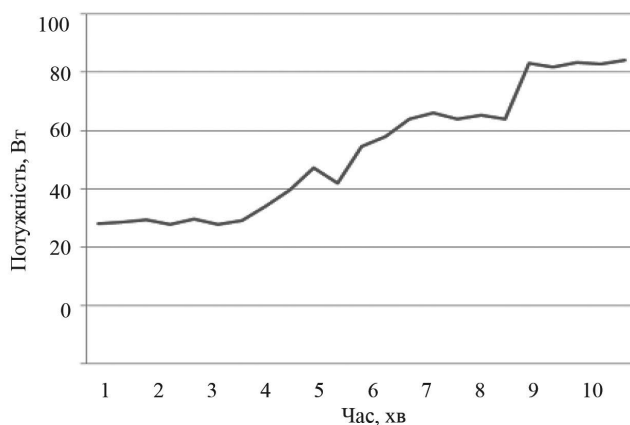


Рис. 1. Графік залежності потужності від часу при включенні лазера TS1390 (з максимальною випромінюваною потужністю 100 Вт)

Із графіка видно, що постійна потужність встановлюється через 7–9 хвилин після включення лазера. Частота проходження імпульсів залежить від поставленого завдання. При гравіюванні невеликих контурів або при різанні в режимі ступінчастої потужності рекомендується невелика частота проходження імпульсів. Що більший діаметр лазерного променя, то менший фокальний діаметр, а отже, менша ширина різку (рис. 2).

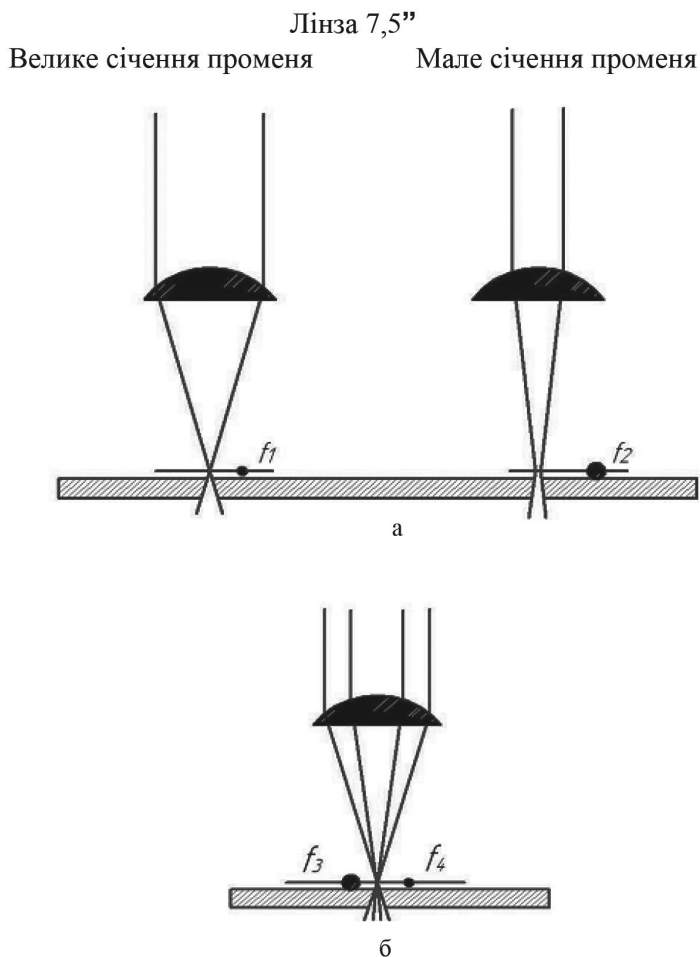


Рис. 2. Ширина різку залежно від діаметра лазерного променя:
а — лінза з діаметром 7,5"; б — лінза з діаметром 5"

Фокальний діаметр залежить від фокусної відстані використовуваної фокусної лінзи. При збігу площини поляризації променя з площиною гравіювання чи розрізування показники швидкості і якості розрізування підвищуються. У цьому випадку на передній поверхні різку відбувається найвище поглинання випромінювання. Якщо площина поляризації перпендикулярна площині різку, то відбувається поглинання випромінювання бічними поверхнями різку.

Швидкість і якість розрізування можуть суттєво змінюватися залежно від зміни напрямку переміщення оптичного пристрою для розрізування фігурних деталей. Для забезпечення максимальної ефективності лазерної обробки доцільно площину поляризації променя за допомогою спеціального пристрою автоматично повертати при зміні напрямку розрізування, щоб вона збігалася з його площиною.

Найкращі результати досягаються при перетворенні лінійно поляризованого випромінювання у випромінювання з круговою поляризацією із застосуванням фазообертального дзеркала, яке встановлюють перед входом в оптичний пристрій для розрізування.

Швидкість розрізування залежить від матеріалу і його товщини. Зі зменшенням товщини матеріалу, швидкість розрізування збільшується. Перевищена чи занижена швидкість може призвести до підвищеної шорсткості, утворення задирок, проплавлення. Зі збільшенням товщини матеріалу швидкість переміщення лазерного променя необхідно зменшувати.

Результат лазерної обробки залежить також від положення фокуса (рис. 3). Залежно від товщини матеріалу, призначеного для розрізування, та глибини гравіювання фокус може розташовуватися над поверхнею аркуша ($f > 0$), на поверхні ($f = 0$) та зміщуватись в глибину ($f < 0$).

Положення фокуса визначається методом контуру плазми (зміни кольору плазми) або визначенням мінімальної товщини утвореного прорізу в матеріалі.

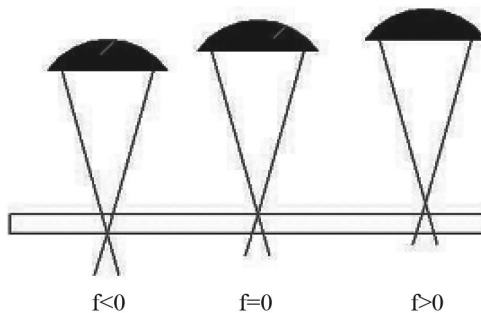


Рис. 3. Положення фокуса

Властивості оброблюваних матеріалів (поглинаюча здатність, теплопровідність, відбиваюча здатність тощо) визначають можливість їх розрізування лазерним променем. Властивості матеріалів залежать від складових їх компонентів та домішок. Щоб більша відбиваюча здатність і теплопровідність полімерних матеріалів, то вища потужність обробки CO_2 -лазером. Дзеркальні поверхні матеріалів призводять до сильного відбивання лазерного променя і поганих результатів обробки, тоді як шорсткі і матові поверхні забезпечують високу швидкість обробки.

Висновки. Проаналізувавши літературні джерела, виділено три термічні моделі, які описують взаємодію лазерного випромінювання з матеріалом. Кожна модель має свої закономірності, які необхідно враховувати під час обробки того чи іншого матеріалу. Зміна щільності світлового потоку для прозорих матеріалів

описується законом Бугера-Ламберта, що є невід'ємною частиною під час планування експериментів і безпосередньому їх проведенні. Аналіз експериментальних досліджень дав змогу визначити основні фактори та режими, які впливають на процес лазерного гравіювання та розрізування поліграфічної продукції. Важливим параметром при лазерному розрізуванні є положення фокуса, яке залежить від товщини зразків. Для якісного розрізування при збільшенні товщини фокус необхідно зміщувати в глибину матеріалу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Bosman J. Processes and strategies for solid state Q-switch laser marking of polymers. Velden, The Netherlands, 2007. 243 p.
2. Марцынюков С. А. Исследование влияния электромагнитного управления на условия существования разряда в лазере на углекислом газе. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. № 4. С. 13–17.
3. Елохин В. А., Жданов И. Г. Методы модуляции излучения СО₂-лазеров. Научное приборостроение. 2003. Т. 13. № 3. С. 46–51.
4. Шаймарданов Р. Лазер СО₂: гибкое, надежное и испытанное средство. Фотоника. 2011. Т. 28. № 4. С. 8–12.
5. Григорьянц А. Г., Богданова М. А. Особенности взаимодействия лазерного излучения с прозрачными диэлектриками. Наука и образование. 2012. № 3. С. 1–15.
6. Лазерная стойкость полимеров / Серова В. Н., Наумов А. К., Мукменева Н. А., Черезова Е. Н. Вестник технологического университета. 2016. Т. 19. Вып. 10. С. 33–37.
7. Hulsenberg D., Harnisch A., Bismarck A. Microstructuring of Glasses. Berlin, Springer-Verlag, 2008. 336 p. (Springer Series in Materials Science).
8. Колдунов М. Ф., Маненков А. А., Покотило И. Л. Механическое разрушение прозрачных твёрдых тел лазерными импульсами разной длительности. Квантовая электроника. 2002. Т. 32. № 4. С. 335–340.
9. Steen W. M., Mazumder J. Laser Material Processing. 4-th Ed. London, Springer, 2010. 576 p.

REFERENCES

1. Bosman, J. (2007). Processes and strategies for solid state Q-switch laser marking of polymers. Velden, The Netherlands (in English).
2. Marcynjukov, S. A. (2013). Issledovanie vlijaniya jelektromagnitnogo upravlenija na uslovija sushhestvovaniya razrjadov v lazere na uglekislom gaze: Izvestija SPbGJeTU «LJeTI», 4, 13–17 (in Russian).
3. Elohin, V. A., & Zhdanov, I. G. (2003). Metody moduljicii izlucheniya SO₂-lazerov: Nauchnoe priborostroenie, 13, 3, 46–51 (in Russian).
4. Shajmardanov, R. (2011). Lazer SO₂: gibkoe, nadezhnoe i ispytannoe sredstvo: Fotonika, 28, 4, 8–12 (in Russian).
5. Grigor'janc, A. G., & Bogdanova, M. A. (2012). Osobennosti vzaimodejstvija lazernogo izlucheniya s prozrachnymi dijelektrikami: Nauka i obrazovanie, 3, 1–15 (in Russian).
6. Serova, V. N., Naumov, A. K., Mukmeneva, N. A., & Cherezova, E. N. (2016). Lazernaja stojkost' polimerov: Vestnik tehnologicheskogo universiteta, 19, 10, 33–37 (in Russian).

7. Hulsenberg, D., Harnisch, A., & Bismarck, A. (2008). *Microstructuring of Glasses*. Berlin, Springer-Verlag (Springer Series in Materials Science) (in English).
8. Koldunov, M. F., Manenkov, A. A., & Pokotilo, I. L. (2002). *Mehanicheskoe razrushenie prozrachnyh tvjordyh tel lazernymi impul'sami raznoj dlitel'nosti: Kvantovaja jelektronika*, 32, 4, 335–340 (in Russian).
9. Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing*. 4-th Ed. London, Springer (in English).

doi: 10.32403/2411-3611-2020-1-37-54-61

RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CO₂ LASER PARAMETERS ON THE LASER PROCESSING PROCESS OF PRINTING PRODUCTS

O. M. Savchenko, M. V. Drobot

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

The mechanisms of energy absorption of laser radiation by transparent and opaque materials are analyzed. There are three thermal models that describe the interaction of laser radiation with the material, where the process of laser processing is long, short and ultrashort pulses. The Bouguer-Lambert law for transparent materials is described. Experimental studies have been performed using a continuous carbon dioxide CO₂-laser on a TS 1390 machine with a power of 100 W. The main factors and modes of laser engraving and cutting process are revealed: laser parameters, processing modes, material-blank parameters and machine parameters. The dependence of the power of the TS1390 laser on the time at its inclusion is studied. The influence of material thickness on cutting speed is revealed. The dependence of the laser beam diameter on the focal diameter, which depends on the focal length of the used focal lens, is graphically presented. It has been experimentally confirmed that the cutting speed and quality can change significantly depending on the change in the direction of movement of the optical device for cutting shaped parts. The position of the focus, which absorbs the result of the laser treatment and depends on the thickness of the material to be cut, and can be located above the surface of the sheet, on the surface and shifted in depth, is shown graphically. It is studied that the properties of the processed materials (absorbency, thermal conductivity, reflectivity, etc.) determine the possibility of laser beam cutting and depend on their constituent components and impurities.

Keywords: CO₂-laser; laser cutting and engraving, laser parameters, printing materials.

Стаття надійшла до редакції 25.03.2020.

Received 25.03.2020.