УДК 621.375.826

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ ВИПРОМІНЮВАННЯ CO_2 -ЛАЗЕРА НА ПРОЦЕС ГРАВІЮВАННЯ ПОЛІМЕРІВ

О. М. Савченко

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

Проаналізовано сфери застосування лазерів. Проведено експериментальні дослідження впливу параметрів лазерного випромінювання CO_2 -лазера на процес гравіювання полімерних матеріалів, які широко використовують у поліграфії. Виявлено залежність глибини гравіювання від зміни швидкості та потужності лазерного випромінювання при різних фокусах. Досліджено, що за збільшення швидкості гравіювання глибина гравіювального шару для всіх матеріалів зменшується, а за посилення потужності випромінювання глибина гравіювання для всіх матеріалів суттєво збільшується. Виявлено основні дефекти під час гравіювання полімерних матеріалів.

Ключові слова: лазерні технології, гравіювання, CO_2 -лазер, потужність лазера, фокус, глибина гравіювального шару, полімерні матеріали.

Постановка проблеми. В останні роки лазер перейшов із наукових лабораторій у виробничі цехи, де використовується як технологічний інструмент із різними діапазонами і режимами. Особливо популярним став процес лазерного гравіювання як природних, так і штучних матеріалів [1]. Лазерне гравіювання полімерів (акрил, полістирол, полікарбонат та ін.) — невіддільний процес у поліграфічній галузі (виготовлення палітурок, обкладинок, друкарських форм, штампів і печаток та ін.), художньо-прикладному мистецтві (створення макетів), медицині, виробництві тощо. З появою лазерних технологій під час виготовлення різноманітної продукції стали доступними технології суміщення і компонування, які є економічно вигідними для невеликих накладів [2].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Лазерне гравіювання стало об'єктом багатьох досліджень. У праці [3] наведено особливості застосування та переваги лазерного гравіювання під час виготовлення рекламної продукції, сувенірів, елітної упаковки, конструювання, товарів для спорту та дому, музичних інструментів тощо. Автори [4] розглядають лазерне маркування як сучасний і гнучкий метод, що дає змогу керувати лазерним променем, точно дозуючи енергію під час маркування в просторі і часі. Для відомих та нових видів лазерної обробки під час виготовлення поліграфічної продукції запропоновано методики вибору режимів оброблення для різних технологічних схем формоутворення та їхнє інформаційне забезпечення [5]. У статті [6] розглянуто полімерні матеріали для прямого лазерного гравіювання

друкарських форм і їхній склад, проаналізовано основні недоліки матеріалів та способи їхнього виправлення. Автор у навчальному посібнику [7] детально описує технологічні процеси поверхневого термооброблення різноманітних матеріалів лазерним променем (лазерне зварювання, різання, свердління отворів, маркування та нанесення штрихкодів, швидке прототипування). Як стверджує автор [8], під час лазерної дії на об'єкт формуються ділянки з характеристиками, які відрізняються від властивостей самого матеріалу. Якщо їхня концентрація стає суттєвою і ці напруження перевищують певний поріг, то система (деталь, зразок) стає нестійкою і, як наслідок, деформується. Ці зміни набагато менші, ніж у традиційних методах термічного оброблення, проте вони є, і завдання технологів — виявити їхні причини та мінімізувати їх.

Мета статті — на основі аналізу видів матеріалів, фізичної суті та технологічного процесу лазерного гравіювання провести експериментальні дослідження впливу параметрів лазерного випромінювання CO₂-лазера на процес гравіювання полімерних матеріалів, які широко використовують у поліграфії під час виготовлення упаковки, сувенірів, рекламної й акцидентної продукції та ін.

Виклад основного матеріалу дослідження. Лазери мають унікальні властивості випромінювання, і тому їх широко застосовують у різних галузях (табл. 1) [9]. У радіоелектроніці, поліграфії активно використовують полімерні матеріали (термореактивні і термопластичні) для виготовлення різноманітних деталей, друкарських форм, пакувань та ін. Їхній перелік постійно розширюється, оскільки вони спрощують і полегшують конструкцію виробу, здешевлюють виготовлення та підвищують його експлуатаційні характеристики і довговічність.

Таблиця 1

Сфери застосування лазерів

Поліграфія	Виготовлення пакування, персоніфікованої продукції, печаток і штампів, друкарських форм для різних способів друку, паперово-білових товарів, палітурок, листівок і візиток, маркування продукції та ін.
Медицина	Хірургія (як скальпель для розрізування або деструкції хворих тканин без пошкодження здорових); терапія (руйнування пухлин або пошкоджень); коагуляція (припікання кровоносних судин для запобігання кровотечі); лазеротерапія (технологія, суть якої полягає в дії цілеспрямованого лазерного потоку на тканину)
Військова справа	Лазерна локація (наземна, бортова, підводна); зв'язок (бездротове передавання даних); навігаційні системи (системи супутникового позиціонування); лазерна зброя (лазерні приціли та системи ураження)
Виробництво	Голографія (створення віртуальних голографічних зображень за допомогою пучків лазерних променів); лазерні віддалеміри (використовують у геодезії); лазерні рівні (застосовують у будівництві); лазерне свердління (використовують для надтвердих та крихких матеріалів)

Лазерні шоу-системи	Різноманітні лазерні світлові шоу з використанням пучків лазерів різної довжини хвилі (кольору); голографічні шоу (із застосуванням лазерів для побудови 3D-зображення в просторі)
Наукова сфера	Хімія (використання лазера як каталізатора); фізика (для проведення різноманітних експериментів); геодезія (для геодезичних досліджень); комп'ютерні науки (для зчитування та запису інформації)
Оптоелектронні пристрої	Камери спостереження (з використанням лазерних сенсорів руху); телевізори (новітні принципи створення зображення за допомогою пучка трьох лазерів RGB); мікро- та телескопи (використання лазерів для точності фокусування); відеокамери (лазерне фокусування точності); прилади нічного бачення (лазерне фокусування); біноклі (можливість лазерного вимірювання точної відстані)
Системи оптичного зв'язку	Оптоволоконні системи (передавання даних оптичним волокном за новими стандартами); бездротові наземні лазерні системи (бездротові оптичні ретранслятори та приймачі); бездротові супутникові системи

Для лазерного гравіювання обрано 5 типів полімерних матеріалів: акрил, Plexiglas, Textures, Lasermix, Satins фірми Rowmark — двохшарові полімерні матеріали: верхній шар — це добавки від 0–10 %: бронза, діоксид титану, сульфат барію та інші. Основа — залежно від виду пластику: акрил, АБС, співполімер акрилу — стирол, поліетилакрилат та ін. (табл. 2).

Таблиця 2

Характеристика матеріалів для лазерного гравіювання

Тип полімеру	Склад полімеру
Акрил	поліметилметакрилат (ПММА) — 100 %
Textures	поліетилакрилат + поліметил-метакрилат (ПММА) — 50–54 %; співполімер акрилстирол — 35–50 %; етилакрилат < 0,1; метилметакрилат < 0,5
Lasermix	поліетилакрилат + поліметилметакрилат (ПММА) — 50–54 %; співполімер акрилстирол — 35–50 %; етилакрилат < 0,1; метилметакрилат < 0,5; алюміній технічний (1–5 %); вуглець (1–5 %); бронза (1–5 %)
Satins	АБС (акрилонітрил-бутадієнстирол 90–95 %); діоксид титану — 1–4 %; сульфат барію — 0–2 %; мінеральна олія — 0–2 %; віск — 0–2 %

Макет рисунка, зображення, виробу створювався з використанням векторного редактора CorelDRAW Graphics Suite 2019 21.3.0.755. Лазерне гравіювання полімерних матеріалів здійснювалося на вуглекислотному лазерному станку TS-1390 (фірми TRANSON) безперервного типу потужністю 100 Вт.

Проведені дослідження склалися з двох етапів — встановлення залежності глибини гравіювання від зміни швидкості під час зміни фокуса: «+0,5», «0» та «-0,5» (фокус може розташовуватися на поверхні аркуша («0»), над поверхнею («-0,5»)

та зміщуватися вглиб матеріалу («+0,5»); другий — визначення залежності глибини гравіювання від зміни потужності випромінювання під час зміни фокуса: «+0,5», «0» та «-0,5».

I. Змінні параметри:

- швидкість;
- фокус.

$F = 0$ мм — фокус; $P = 35$ Вт = const — потужність; V — швидкість гравіювання; м/с — змінний параметр; діапазон зміни швидкості — 0,75...1,2 м/с.

Рис. 1. Залежність глибини гравіювального шару від швидкості гравіювання (фокус $F = 0$ мм)

II. Змінні параметри:

- швидкість;
- фокус

$F = +0,5$ мм — фокус; $P = 35$ Вт = const — потужність; V — швидкість гравіювання; м/с — змінний параметр; діапазон зміни швидкості — 0,75...1,2 м/с.

Рис. 2. Залежність глибини гравіювального шару від швидкості гравіювання (фокус $F = +0,5$ мм)

III. Змінні параметри:

- швидкість;
- фокус

$F = -0,5$ мм — фокус; $P = 35$ Вт = const — потужність; V — швидкість гравіювання; м/с — змінний параметр; діапазон зміни швидкості — $0,75 \dots 1,2$ м/с.

Рис. 3. Залежність глибини гравіювального шару від швидкості гравіювання (фокус $F = -0,5$ мм)

IV. Змінні параметри:

- потужність;
- фокус

$F = 0$ мм — фокус; $V = 1,0$ м/с = const — швидкість гравіювання; P — потужність; Вт — змінний параметр; діапазон зміни потужності — $20 \dots 50$ Вт.

Рис. 4. Залежність глибини гравіювального шару від потужності випромінювання (фокус $F = 0$ мм)

V. Змінні параметри:

- потужність;
- фокус.

$F = +0,5$ мм — фокус; $V = 1,0$ м/с = const — швидкість гравіювання; P — потужність; Вт — змінний параметр; діапазон зміни потужності — 20...50 Вт.

Рис. 5. Залежність глибини гравіювального шару від потужності випромінювання (фокус $F = +0,5$ мм)

VI. Змінні параметри:

- потужність;
- фокус.

$F = -0,5$ мм — фокус; $V = 1,0$ м/с = const — швидкість гравіювання; P — потужність; Вт — змінний параметр; діапазон зміни потужності — 20...50 Вт.

Рис. 6. Залежність глибини гравіювального шару від потужності випромінювання (фокус $F = -0,5$ мм)

На основі виконаних експериментальних досліджень можна зазначити, що зміна фокуса не призводить до значних змін, хоча в деяких випадках спостерігається візуальне покращення оброблення поверхні під час заглиблення фокуса («+0,5»).

За збільшення швидкості гравіювання глибина гравіювального шару для всіх матеріалів (рис. 1–3) зменшується. Тепло від лазерного променя не встигає здійснити структурні зміни матеріалу за окреслений проміжок часу. Глибина гравіювання пластику Textures за швидкості 0,75 м/с становить 0,17 мм, за швидкості 1,2 м/с — 0,13

мм (різниця — 0,04 мм). Під час гравіювання Satins швидкістю 0,75 м/с глибина гравіювання — 0,20 мм, за швидкості 1,2 м/с — 0,06 мм (різниця — 0,14 мм).

За посилення потужності випромінювання глибина гравіювання для всіх матеріалів (рис. 4–6) суттєво збільшується. За потужності 20 Вт полімерний матеріал LaserMax має глибину гравіювання 0,14 мм, а за потужності 50 Вт — 0,24 мм (різниця становить 0,1 мм). Під час гравіювання пластику Satins потужністю 20 Вт і 50 Вт різниця в глибині гравіювання — $0,29 - 0,13 = 0,16$ мм.

Під час введення електропровідних наповнювачів зростає теплопровідність полімерного матеріалу. На відміну від чистих полімерів, у таких композиціях поряд із фононним спостерігається і електронний механізм теплопровідності, характерний для провідників. Відповідно до більшості графіків, найбільшої глибини гравіювання досягнуто у LaserMax, Satins і акрилу, що пов'язано з наявністю у верхньому шарі металевих домішок: у LaserMax — алюміній, технічний вуглець, бронза (теплопровідність становить 0,22 Вт/м•К), у Satins — діоксид титану, сульфат барію (0,24 Вт/м•К). Акрил, який не має верхнього шару, характеризується оптимальною провідністю (0,19 Вт/м•К) — також добре гравіюється. Відповідно, теоретичні дані про вплив домішок підтверджені експериментально.

Результати експериментальних досліджень лазерного гравіювання полімерних матеріалів засвідчили, що зміна швидкості гравіювання, потужності випромінювання та різниця в теплофізичних властивостях складників матеріалу впливають на характеристики гравіювання і, як наслідок, якість оброблення, до якої ставлять певні вимоги. Краї (межі) зображень повинні мати чітко виражену прямолінійну форму без заокруглень, підпалвлення, порушень плоскої форми поверхні, усі елементи і їхні закінчення повинні бути правильної геометричної форми. Однак під час виготовлення гравіюваного зображення можуть траплятися і деякі дефекти:

1. Паралельні смуги різної ширини з одним напрямом або кутом нахилу як відображення поверхні структури матеріалу.
2. Тонкі нерівномірні за довжиною смуги, кожна з яких є продовженням іншої, і в сукупності вони виглядають як окремі лінії.
3. Наявність «розривів» у вузьких штрихах, що є характерним під час перевищення швидкості гравіювання.
4. Наявність стовпчиків або горбків, які з'являються внаслідок механічних вкраплень у матеріалі. Як засвідчили дослідження, вони можуть розташовуватися поряд чи зливатися в один та мати різну їхню кількість.

Тому для цього необхідно враховувати найбільш важливі параметри: тип оброблюваного матеріалу, вид оброблення, технічне завдання (для конкретного матеріалу), технологічну операцію, серійність тощо.

Висновки. Внаслідок проведених експериментальних досліджень із лазерного гравіювання полімерних матеріалів виявлено, що збільшення швидкості гравіювання призводить до зменшення глибини гравіювального шару, а з посиленням потужності випромінювання суттєво збільшується глибина гравіювання. Зміна фокуса не призводить до значних змін, хоча в деяких випадках спостерігається візуальне покращення оброблення поверхні під час його заглиблення («+0,5»). Виявлення де-

фектів під час гравіювання полімерних матеріалів дає змогу оптимізувати розподіл енергії CO₂-випромінювання в матеріалі, підвищивши ефективність роботи устаткування та якість продукції. Для цього необхідно враховувати найбільш важливі параметри: тип оброблюваного матеріалу, вид оброблення, технічне завдання (для конкретного матеріалу), технологічну операцію, серійність тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Особливості лазерного гравіювання виробів із пластмас / Котляров В. П., Лаврінєнков Є. О., Титаренко О. О., Аліверді М. А. *Наукові вісті «КПІ»*. 2010. № 6. С. 90–97.
2. Закалюкіна Л. А., Баннов В. Я. Виды и параметры процесса лазерной резки. *Новые информационные технологии в автоматизированных системах*. 2016. № 19. С. 163–167. URL: <https://docplayer.ru/64774933-Vidy-i-parametry-processa-lazernoy-rezki.html> (дата звернення 11.09.2020).
3. Савченко О. М. Особливості застосування лазерного гравіювання. *X Міжнародна науково-практична конференція «Квалілогія книги»* : матеріали конф. (12 вересня 2019 р.). Львів : УАД, 2019. С. 74–75.
4. Кузьміна Т. А., Масягин В. Б. Лазерная гравировка как современный метод маркировки. *«Научное сообщество студентов XXI столетия. Технические науки»* : Электронный сборник статей по материалам XVII студенческой международной научно-практической конференции. Новосибирск : изд. «СибАК». 2014. № 2 (17). С. 41–47. URL: [http://www.sibac.info/archive/Technic/2\(17\).pdf](http://www.sibac.info/archive/Technic/2(17).pdf). (дата звернення 14.09.2020).
5. Технологічне забезпечення операцій лазерної технології в поліграфії / Котляров В. П., Аліверді М. А., Артемчук О. І., Талімонова Н. Л. *Технологія і техніка друкарства*. 2011. Вип. 1. С. 52–63. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titd_2011_1_11 (дата звернення 17.09.2020).
6. Ярکا Н. В., Майк В. З. Матеріали для виготовлення друкарських форм лазерним гравіюванням. *Технологія і техніка друкарства*. 2012. Вип. 2 (36). С. 60–67.
7. Бобицький Я. В., Матвіїшин Г. Л. Лазерні технології : навч. посіб. Ч. 1 / М-во освіти і науки України, Нац. ун-т «Львівська політехніка». Львів : Вид-во Львівської політехніки, 2015. 316 с. URL: <http://vlp.com.ua/node/20115> (дата звернення 20.09.2020).
8. Остаточные деформации и дефекты при лазерной резке / Майоров В. С., Майоров С. В., Хоменко М. Д., Гришаев Р. В. / Институт проблем лазерных и информационных технологий. РАН, г. Шатура. 5 с. URL: <https://docplayer.ru/35912869-Ostatocnyye-deformacii-i-defekty-pri-lazernoy-rezke.html> (дата звернення 22.09.2020).
9. 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 12.09.2020).

REFERENCES

1. Kotliarov, V. P., Lavrinenkov, Ye. O., Tytarenko, O. O., & Aliverdi, M. A. (2010). Osoblyvosti lazernoho hraviruvannia vyrobiv iz plastmas: Naukovi visti «KPI», 6, 90–97 (in Ukrainian).
2. Zakaljukina, L. A., & Bannov, V. Ja. (2016). Vidy i parametry processa lazernoj rezki: Novye informacionnye tehnologii v avtomatizirovannyh sistemah, 19, 163–167. Retrieved

- from <https://docplayer.ru/64774933-Vidy-i-parametry-processa-lazernoy-rezki.html> (data zvernennja 11.09.2020) (in Russian).
3. Savchenko, O. M. (2019). Osoblyvosti zastosuvannia lazernoho hraviiuvannia. X Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia «Kvalilohiia knyhy» : materialy konf. (12 veresnia 2019 r.). Lviv : UAD, 74–75 (in Ukrainian).
 4. Kuz'mina, T. A., & Masjagin, V. B. (2014). Lazernaja gravirovka kak sovremennij metod markirovki. «Nauchnoe soobshhestvo studentov XXI stoletija. Tehnicheskie nauki» : Jelektronnyj sbornik statej po materialam XVII studencheskoj mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii. Novosibirsk : izd. «SibAK», 2 (17), 41–47. Retrieved from [http://www.sibac.info/archive/Technic/2\(17\).pdf](http://www.sibac.info/archive/Technic/2(17).pdf) (data zvernennja 14.09.2020). (in Russian).
 5. Kotliarov, V. P., Aliverdi, M. A., Artemchuk, O. I., & Talimonova, N. L. (2011). Tekhnolohichne zabezpechennia operatsii lazernoi tekhnolohii v polihrafii: Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva, 1, 52–63. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/Titd_2011_1_11 (data zvernennia 17.09.2020) (in Ukrainian).
 6. Yarka, N. V., & Maik, V. Z. (2012). Materialy dlja vyhotovlennia drukarskykh form lazernym hraviiuvanniam: Tekhnolohiia i tekhnika drukarstva, 2 (36), 60–67 (in Ukrainian).
 7. Bobytskyi, Ya. V., & Matviishyn, H. L. (2015). Lazerni tekhnolohii. Ch. 1 / M-vo osvity i nauky Ukrainy, Nats. un-t «Lvivska politekhnika». Lviv : Vyd-vo Lvivskoi politekhniky. Retrieved from <http://vlp.com.ua/node/20115> (data zvernennia 20.09.2020) (in Ukrainian).
 8. Majorov, V. S., Majorov, S. V., Homenko, M. D., & Grishaev, R. V. Ostatochnye deformacii i defekty pri lazernoj rezke / Institut problem lazernyh i informacionnyh tehnologij. RAN, g. Shatura. Retrieved from <https://docplayer.ru/35912869-Ostatochnye-deformacii-i-defekty-pri-lazernoy-rezke.html> (data zvernennja 22.09.2020) (in Russian).
 9. Hrynchyshyn, T. M., & Kit, H. V. (2014). Zastosuvannia optychnykh lazernykh system ta perspektyvy yikh podalshoho rozvytku: Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika». Informatsiini systemy ta merezhi, 805, 96–105. Retrieved from http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPICM_2014_805_13 (data zvernennia 12.09.2020) (in Ukrainian).

doi: 10.32403/2411-3611-2020-2-38-88-97

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE INFLUENCE OF CO₂ LASER RADIATION PARAMETERS ON THE POLYMER ENGRAVING PROCESS

O. M. Savchenko

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

The areas of application of lasers in printing, medicine, military affairs, production, science, communication systems are given. Experimental studies of the influence of CO₂

laser radiation parameters on the engraving process of polymeric materials, which are widely used in printing, have been carried out. 5 types of polymeric materials were selected for laser engraving: Acrylic, Plexiglas, Textures, Lasermax, Satins of Rowmark company. Laser engraving was performed on a carbon dioxide laser machine TS-1390 (TRANSON company) of continuous type with a power of 100 W. The research consisted of two parts, as a result of which the dependence of the engraving depth on the change of the speed and power of the laser radiation at different foci was revealed. It is studied that with increasing engraving speed the depth of the engraving layer for all materials decreases, and with increasing radiation power the depth of engraving for all materials increases significantly. It was found that the change of focus does not lead to significant changes, although in some cases there is a visual improvement of surface treatment when deepening the focus (" +0.5 "). The greatest depth of engraving was experimentally revealed in LaserMax, Satins and Acrylic, which is due to the presence of metal inclusions in the upper layer: in LaserMax - aluminum, carbon black, bronze; in Satins - titanium dioxide, barium sulfate; Acrylic does not have an upper layer, but it is characterized by good conductivity (0.19 W/m•K), so it is well engraved. The main defects in the engraving of polymeric materials are given. The most important parameters are taken into account: a type of processed material, a type of processing, technical task (for a specific material), technological operation, serial number, etc., which need to be paid attention to first of all during laser engraving.

Keywords: *laser technologies, engraving, CO₂ laser, laser power, focus, depth of engraving layer, polymeric materials.*

Стаття надійшла до редакції 25.09.2020.

Received 25.09.2020.