

УДК 621.375.826

## ВИВЧЕННЯ РЕЖИМНИХ ФАКТОРІВ ТА ФІЗИЧНИХ ЯВИЩ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

**Савченко О. М.**

к.т.н., доцент, кафедра поліграфічних медійних технологій і пакувань,  
Українська академія друкарства

***Анотація.** Наведена класифікація та характеристика методів лазерної обробки. Досліджено, що у секторі упаковки найбільш використовуваний вуглекислотний CO<sub>2</sub>-лазер з довжиною хвилі 10,6 мікрометра, яка належить до далекої інфрачервоної області і дуже добре поглинається органічними матеріалами, зокрема папером і картоном. Комбіновані матеріали (PP, PET тощо), які використовуються при виготовленні етикетки та харчової упаковки обробляються при довжині хвилі CO<sub>2</sub> 10,2 мкм. Ключовими факторами при вивченні фізичних явищ та режимних факторів процесу лазерної обробки для встановлення та підтвердження зв'язку між параметрами лазерного процесу, умовами праці та вихідними параметрами є довжина хвилі лазера, його стабільність, потужність, швидкість обробки, різкість фокусування, що дозволить визначити точність, повторюваність і надійність лазерного процесу.*

***Ключові слова:** ЛАЗЕРНА ОБРОБКА, ВУГЛЕКИСЛОТНИЙ ЛАЗЕРНИЙ СТАНОК, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ПОЛІГРАФІЧНА ПРОДУКЦІЯ, РЕЖИМНІ ФАКТОРИ, ФІЗИЧНІ ЯВИЩА*

### **Вступ**

З'явившись у середині ХХ століття, лазери увійшли практично в усі області діяльності людини. Значущу роль вони відіграли у новітніх оптичних засобах зв'язку, що складає величезний пласт сучасного життя людини. Володіючи неймовірно багатогранними властивостями, лазерний промінь "висвічує" собі шлях абсолютно у всіх сферах людського життя, роблячи його якіснішим та комфортнішим.

З англійської «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation» перекладається як « посилення світла за рахунок стимульованого випромінювання» і відповідно до перших літер цього виразу створена аббревіатура LASER. Продукуючи потік світла надзвичайної концентрації, лазер відкриває перед сучасною наукою нові перспективи розвитку [1].

Лазерну модифікацію поверхні (LSM) можна визначити як будь-який лазерний процес, який модифікує матеріал. Ці процеси використовуються для надання певних бажаних фізичних і хімічних властивостей матеріалу, наприклад, хімічний склад поверхні або морфологія поверхні, які вивчались в роботах [2, 3]. Такі модифікації застосовувались для різноманітних матеріалів: металів, полімерів, кераміки, що досліджувались вченими у наукових публікаціях [4-6]. У статті [7] автори ознайомили з основами техніки текстурування та прикладами її застосування для обробки поверхні різних матеріалів (полімери, метали,

кераміка чи навіть природний камінь) з екстремальними властивостями змочування: супергідрофільні, супергідрофобні та омніфобні поверхні, які були отримані лазерним текстуруванням, що також не мало важно в друкарських процесах видавничо-поліграфічної промисловості (усі типи поверхонь друкарських форм, фарби, клеї, мастила, мийні засоби, корозія металів та ін.). Було виявлено, що лазерне текстурування є чудовою технікою для зміни змочування поверхні різноманітних матеріалів. Відносна простота та надійність результатів разом із широкою доступністю промислових лазерних джерел зробили лазерне текстурування перспективним інструментом для модифікації поверхні деталей на виробничих підприємствах. Науковцями [8] здійснено порівняння методів механічної поверхневої обробки для поліпшення властивостей нержавіючої сталі з дослідженням впливу лазерної ударної обробки (LSP), кавітаційної обробки у воді (WjCP), дробоструминної обробки у воді (WjSP) та ультразвукової ударної обробки (UIT) на шорсткість, твердість та залишкові напруження поверхні. Всі методи зміцнення викликають залишкові напруження стиснення в приповерхневому шарі, що підвищує зносостійкість/корозійну стійкість і втомну міцність в досліджуваному матеріалі.

### **Мета та задачі дослідження**

Основу методів лазерної поверхневої обробки становлять складні швидкоплинні фізико-хімічні процеси. Їх знання, уміння обчислювати їх, розраховувати окремі випадки, прогнозувати наслідки та результати обробки, реалізовувати процеси – все це необхідно фахівцям виробництва, де впроваджуються сучасні лазерні технології. Тому метою даної роботи є вивчення режимних факторів та виявлення технологічних закономірностей процесу лазерної обробки матеріалів, які використовуються при виготовленні поліграфічної продукції (картони, пластикові і полімерні матеріали).

### **Основна частина**

Впродовж багатьох десятиліть властивості поверхні матеріалів покращувалися з використанням різноманітних покриттів і методів модифікації поверхні відповідно до умов експлуатації, включаючи вимоги до терміну служби компонентів під дією температури, умови зношування чи втоми. Для покращення властивостей поверхні в порівнянні зі звичайними технологіями, такі як загартовування в полум'ї, електронні та іонні методи, отримали розвиток плазмова і лазерна обробка, які успішно використовуються у техніці модифікації поверхні [9].

Поверхнева лазерна обробка (англ. laser surface processing) – це локальне нагрівання, плавлення чи випаровування матеріалу, що обробляється під дією тепла, поглинутого матеріалом у місці дії лазерного випромінювання. Залежно від величини щільності потужності лазерної дії реалізуються різні процеси

лазерної поверхневої обробки. В основі цих процесів лежать незвичайні структурні та фазові зміни в матеріалі, що виникають внаслідок надвисоких швидкостей його нагрівання і подальшого охолодження в умовах лазерного випромінювання. Важливу роль при цьому відіграють можливість насичення поверхневого шару елементами навколишнього середовища, зростання щільності дислокацій в зоні опромінення та інші ефекти. Лазерну обробку використовують для таких операцій: вирізання заготовок, модифікація поверхні матеріалу (LSM), нанесення маркування, гравірування, локальне легування, запаювання, зварювання, наплавлення, легування тощо, в тому числі і у поліграфічній галузі [10, 11].

За типом модифікації [9] вчені класифікують LSM (гартування, текстурування, відпал тощо) або відповідно до температури обробки (нагрівання, спікання, плавлення або плазма). Лазерна термічна обробка поверхні є процесом без плавлення, тоді як при лазерному плавленні поверхні відбувається розплавлення її тонким шаром з подальшим застиганням і утворенням твердої структури.

Під час лазерної ударної обробки (LSP) поверхнева залишкова напруга стиснення діє на матеріал за допомогою ударних хвиль лазерної обробки. При лазерному напавленні (спосіб нанесення функціональних покриттів) відбувається плавлення матеріалу основи і оплавлення порошкової суміші, яка на нього наплавляється.

Традиційно для маркування та нанесення інформації на упаковку використовуються такі способи: струменевий друк, термотрансферний друк, штампування, гаряче тиснення, механічне гравірування, які засновані на контакті між інструментом і заготовкою. У порівнянні з ними технологічні лазери мають ряд переваг:

- гнучкість із надзвичайно точним контролем глибини різку, високою повторюваністю та стабільністю без необхідності зміни інструментів, на відміну від механічних альтернатив;

- здатність фокусування лазерного променя в одну малесеньку крапку діаметром мікрон;

- завдяки величезній потужності лазери безперервної дії активно використовуються для розрізування, зварювання або запаювання деталей, виготовлених з різноманітних матеріалів;

- при високій температурі лазерним випромінюванням реально зварювати навіть ті матеріали, які не можна з'єднати між собою іншими методами. Наприклад, зварювання металу і кераміки з отриманням нового матеріалу – металокераміки, який має унікальні властивості;

- завдяки своїй універсальності та легкості лазери можна інтегрувати в існуючі виробничі лінії у поєднанні з гальваносистемою, ріжучою головкою або їх комбінацією;

- ідеальна прямолінійність лазерного променя з використанням імпульсних лазерів забезпечує вимірювання величезних відстаней з відліком часу;

- короткий оптичний імпульс лазера із високою піковою потужністю покращує якість краю та мінімізує зону теплового впливу;
- стабільність потужності (в межах 1%) забезпечує високий рівень повторюваності процесу;
- відсутність шкідливих викидів;
- стійкість та довговічність нанесеного зображення, безконтактність процесу та відсутність затратних матеріалів [11].

## Результати досліджень

Спостерігаючи за інтенсивним розвитком лазерів, практично щороку з'являються нові їх види – хімічні, ексімерні, напівпровідникові, лазери на вільних електронах та ін. У залежності від матеріалу і бажаного процесу обробки різні типи лазерів використовують різні джерела живлення. Найпоширенішими для різання, свердління та мікрообробки матеріалів є CO<sub>2</sub> та Nd:YAG лазери, які дозволили виготовляти більш дрібні деталі за допомогою лазерної обробки в порівнянні зі звичайними техніками гравірування. Популярним вибором для мікрообробки стали лазери з короткими імпульсами (пікосекундні (ps) і фемтосекундні (fs)) завдяки високій гнучкості і дуже малій зоні індукованого теплового впливу (ТВ). Фемтосекундні лазери забезпечують високоякісну мікрообробку з мінімальними термічними пошкодженнями, оскільки коротка тривалість імпульсу призводить до високої пікової потужності. У результаті матеріал видаляється випаровуванням, а не плавленням, як це відбувається при довгому імпульсі (тобто наносекундні) або безперервною лазерною обробкою матеріалу. Наносекундні лазери зазвичай забезпечують вищу енергію з відносно нижчою частотою повторення, створюючи більше теплового пошкодження, ніж пікосекундні та фемтосекундні лазери.

На ринках упаковки та етикетки механічне (або штампове) розрізування чи висікання добре підходить для великих обсягів стандартної продукції. Інновації є ключовою відмінністю, оскільки тенденції пакувальних етикеток полягають у регулярній зміні їх форми та розміру, а також використання нових матеріалів, тому пакувальна галузь потребує гнучких інструментів. При використанні будь-якої лазерної обробки тип використовуваної потужності залежить від двох основних факторів: матеріалу, який потрібно обробити, та швидкості його обробки. Як правило, бажана швидкість лазерного джерела пропорційна необхідному рівню потужності. Враховуючи, що лазер випромінює промінь поляризованого світла з певною довжиною хвилі, деякі матеріали добре поглинають певні довжини хвиль, інші ні. Вибір довжини хвилі лазера, яка краще поглинається певним матеріалом забезпечує швидкий процес і високу якість обробки. Устаткування на основі CO<sub>2</sub>-лазера добре зарекомендувало себе в багатьох галузях і стало інструментом вибору як для вузьких, так і широких веб-додатків. У секторі упаковки найбільш

використовуваний вуглекислотний CO<sub>2</sub>-лазер з довжиною хвилі 10,6 мікрометра, яка належить до далекої інфрачервоної області і дуже добре поглинається органічними матеріалами. На ринку, де домінуючими товарами є паперові етикетки, перевагу надають лазерам з довжиною хвилі 10,6 мкм, яка забезпечує на 10% більше потужності, ніж лазер з довжиною хвилі 10,25 мкм. Комбіновані матеріали (PP, PET тощо), які використовуються при виготовленні етикетки та харчової упаковки обробляються при довжині хвилі CO<sub>2</sub> 10,2 мкм. Якщо планується обробляти різноманітність матеріалів, необхідно оптимізувати налаштування для кожного матеріалу з підбором найбільш відповідної довжини хвилі лазера для забезпечення гнучкості процесів маркування, різання чи гравірування.

Іншим ключовим фактором є стабільність лазера. Самоклеючі етикетки в основному складаються з 3 шарів: носій або підкладка, яка легко відокремлюється, сполучний агент (клеювий шар) і верхній шар з паперу чи плівки, призначений для друкування («наклейка»). Для їх розрізування лазер повинен розрізати наклейку та склеювальний агент, не пошкоджуючи матеріал носій. Для заданої форми етикетки під час різання паперу використовується лазер зазвичай з високим робочим циклом, тоді як під час різання поліпропілену лазер використовується з нижчим робочим циклом. Наявність стабільного лазера в усьому діапазоні потужності дозволяє контролювати глибину різання а, отже, якість обробки [11].

Функція регулювання потужності лазерного устаткування адаптує режим його роботи до процесу обробки, керуючи частотою, потужністю та робочим циклом лазера в режимі реального часу, тобто синхронно контролює потужність лазера й осі подавання під час обробки складних деталей на високих швидкостях.

При вивченні фізичних явищ та дослідженні впливу режимних факторів процесу лазерної обробки необхідно розглянути структуру лазера (рис. 1). Типовий лазер складається з трубки, всередині якої розміщений твердий кристал, найчастіше рубін. З обидвох торців вона закрита дзеркалами: прозорим і частково прозорим. Під дією електричного розряду в трубці атоми кристалу генерують світлові хвилі, які переміщуються від одного дзеркала до іншого до тих пір, поки не наберуть інтенсивності, достатньої для проходження через частково прозоре дзеркало.

Утворення лазерного променя включає наступні етапи.

**1 етап** – при виключеному лазері електрони всіх атомів (на рис. 2 – чорні крапки на внутрішніх колах) займають основний енергетичний рівень.

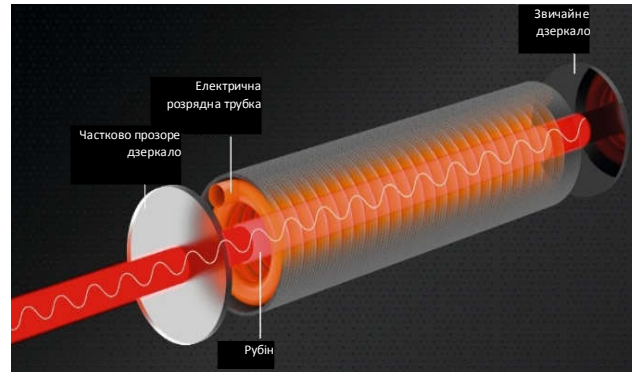
**2 етап** – момент після включення лазера.

Під дією енергії з розрядної трубки електрони переміщуються на більш високі енергетичні орбіти (на рис. 3 – зовнішні кола).

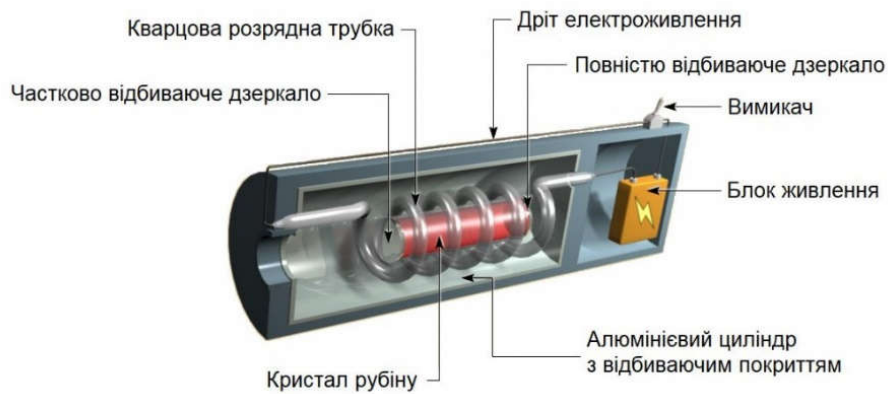
**3 етап** – утворення променя.

Електрони покидають високі енергетичні орбіти та опускаються до основного рівня (рис. 4). При цьому вони починають випромінювати світло і

спонукають до цього решту електронів, в результаті чого утворюється загальний результуючий пучок світла з однаковою довжиною хвилі у кожному джерелі. Чим більше нових електронів повернется до низьких орбіт, тим потужніше світло лазера.



а



б

Рисунок 1 – Структура лазера

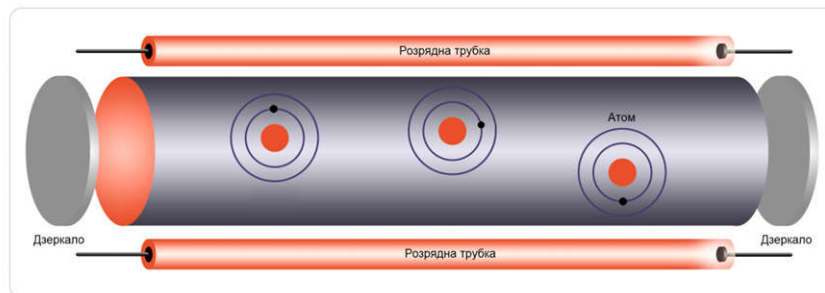


Рисунок 2 – Виключений лазер

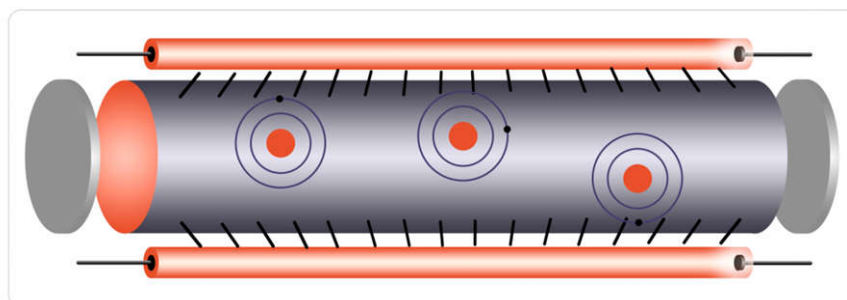


Рисунок 3 – Момент після включення лазера

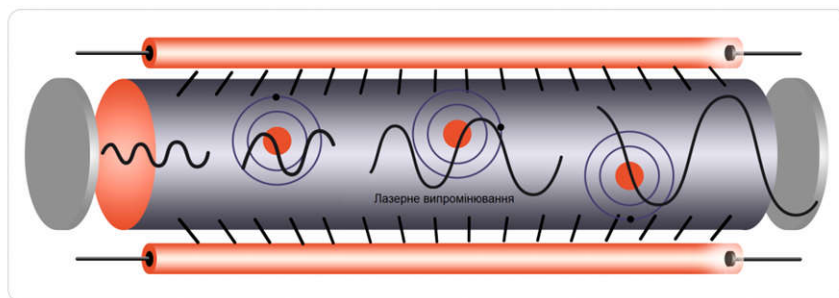
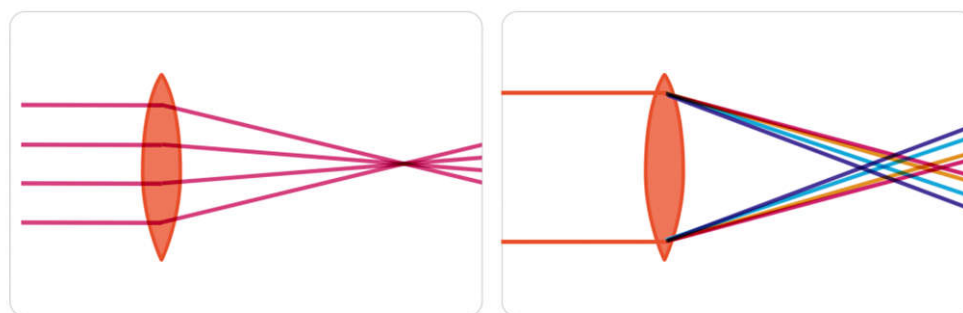


Рисунок 4 – Утворення променя

Для лазера характерна висока **різкість фокусування**. Довжина світлової хвилі у лазерному пучку тільки одна, тому і колір також один. Це світло чітко фокусується лінзою майже повністю в одній точці (рис. 5, а – світло лазера, рис. 5, б – природне світло). Порівнюючи світло лазера з природним світлом, видно, що останнє не може мати настільки різкий фокус. Завдяки концентрації у вузькому промені величезної енергії лазер здатен передати цей промінь на гігантські відстані, уникаючи розсіювання і ослаблення, що властиво багатоколірному світлу – природному. Саме ці якості лазера перетворюють його у незамінний інструмент для людини.



а

б

Рисунок 5 – Фокусоване лінзою світло: а – світло лазера, б – природне світло

Лазерне випромінювання може утворюватись тільки у так званому «активному середовищі», яким є спеціальна речовина. У перших лазерах вона складалася з кристалів рубіну або алюмоітрієвого гранату. Сформований з неї циліндр або стержень вставляють у резонатор, що складається з двох паралельних одне до одного дзеркал. Переднє дзеркало є частково прозорим, а заднє звичайним, яке повністю відбиває світло. Поруч зі стержнем (циліндром) монтується імпульсна лампа. Циліндр та імпульсна лампа оточені дзеркалом, виготовленим з кварцу, на який нанесено шар металу. За допомогою дзеркала світло збирається на циліндрі.

Склад «активного середовища» такий, що у кожному з його атомів є як мінімум три енергетичних рівні. У спокійному стані атоми «активного середовища» розташовуються на нижньому енергетичному рівні  $E_0$ . Як тільки включається лампа, атоми поглинають енергію її світла, піднімаються на рівень  $E_1$  і досить довго перебувають у такому збудженому стані. Саме це і забезпечує лазерний імпульс.

До фундаментального фізичного поняття належить інверсна заселеність – стан середовища, коли кількість часток на будь-якому верхньому енергетичному рівні атому (будь-якому з існуючих) більша, ніж на нижньому. Власне, активним і є те середовище, у якому рівні інверсно заселені.

Електрони атому не розташовуються хаотично, а оточуючи ядро, займають певні орбіти. Атом, що отримав квант енергії, з величезною вірогідністю переходить у стан збудження, який характеризується зміною орбіти електронами – з найнижчої (метастабільної або основної) на орбіту, що характеризується більш високим рівнем енергії. На такій орбіті тривале знаходження електронів неможливе, тому відбувається їх мимовільне повернення до основного рівня. У момент повернення кожен електрон випромінює порцію світла, що зветься фотоном. Одним атомом запускається ланцюгова реакція і електрони багатьох інших атомів також переміщуються на орбіти з більш низькою енергією. Однакові світлові хвилі рухаються величезним потоком. Зміни цих хвиль узгоджені у часі і в результаті формують загальний потужний світловий пучок, який є лазерним променем. Потужність променю у частини лазерів настільки велика, що здатна розрізувати метали, камінь та інші важко розрізані матеріали.

Узагальнюючи, можна виділити такі властивості лазерного випромінювання:

- світло від лазера має особливі і дуже цінні властивості, що вигідно відрізняють його від світла звичайних теплових джерел;

- випромінювання лазера когерентне і практично повністю монохроматичне. Раніше подібні властивості мали тільки радіохвилі від добре стабілізованих передавачів;

- розповсюдження вимушеного випромінювання відбувається тільки вздовж осі резонатора. У зв'язку з цим, розширення лазерного променя дуже слабке, має майже непомітне розходження (кілька кутових секунд);

- здатність лазерного променя фокусуватись у крапку неймовірно маленького розміру. Енергія у крапці його фокусу має величезну щільність;

- завдяки монохроматичності випромінювання і надзвичайної щільності енергії, лазерне випромінювання може досягати дуже високих температур. Наприклад, температура випромінювання імпульсного лазера потужністю порядку петаواتу (10<sup>15</sup> Вт) складає більше 100 мільйонів градусів [1, 12].

## **Висновки**

СО<sub>2</sub>-лазери використовуються в широкому діапазоні галузей промисловості та застосувань, оскільки пропонують підвищену гнучкість виробництва, покращений час виробництва та менші експлуатаційні витрати.

Лазерна обробка має широкий спектр застосування від мікро/нанотехнологій виготовлення до поверхневої обробки, структурування, модифікації та керованої поверхневої пластичної деформації. Лазер як взаємодія матерії є складним явищем, а прогрес у застосуванні лазерної обробки вимагає

точного опису різних процесів, що відбуваються під час роботи лазера при взаємодії з різними матеріалами. Прогнозування реакції лазерної обробки для конкретного застосування здійснено шляхом встановлення зв'язку між входом параметрів процесу (параметри лазера та умови роботи) та виходом (результуюча властивість «оброблюваний матеріал»). Для цього вивчено фізичні явища та вплив режимних факторів процесу лазерної обробки для встановлення та підтвердження зв'язку між параметрами лазерного процесу, умовами праці та вихідними параметрами. Це дозволяє визначити точність, повторюваність і надійність лазерного процесу, що забезпечить використання даних методів різними галузями промисловості, які все більше впроваджують нові лазерні технології.

#### Список літератури.

1. Acland, T. (2019, Jun 11). What are lasers?. *Science & Education*. <https://hitecher.com/articles/what-are-lasers>
2. Kannatey-Asibu, E. (2009). *Principles of Laser Materials Processing*, (4), 820. <https://doi.org/10.1002/9780470459300>.
3. Savchenko, O. (2021). Prospects of CO<sub>2</sub> laser treatment of materials. *Topical issues, achievements and innovations of fundamental and applied sciences: Abstracts of X International Scientific and Practical Conference (Lisbon, Portugal, March 09-12)*, 315-318. <https://isg-konf.com>.
4. Karthik, D., Kalainathan, S., & Swaroop, S. (2015). Surface and Coatings Technology Surface modification of 17-4 PH stainless steel by laser peening without protective coating process. *Surface and Coatings Technology*, (278), 138-145. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.08.012>.
5. Савченко, О.М. (2020). Експериментальні дослідження впливу параметрів випромінювання СО<sub>2</sub>-лазера на процес гравіювання полімерів. *Квалілогія книги*, 2(38), 88-97. <http://www.uad.lviv.ua/naukovi-vydannia/52-kvalilohiia-knyhy/233-arkhiv-vydannia-kvalilohiia-knyhy>.
6. Riveiro, A., Soto, R., Del Val, J., Comesaña, R., Boutinguiza, M., Quintero, F., Lusquiños, F., & Pou, J. (2014). Laser surface modification of ultra-high-molecular-weight polyethylene (UHMWPE) for biomedical applications. *Appl. Surf. Sci.*, (302), 236-242. <https://doi.org/10.1016/J.APSUSC.2014.02.130>.
7. Riveiro, A., Pou, P., Del Val, J., Comesaña, R., Arias-González, F., Lusquiños, F., Boutinguiza, M., Quintero, F., Badaoui, A., & Pou, J. (2020). Laser texturing to control the wettability of materials. *Procedia CIRP*, 879-884. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.09.065>.
8. Lesyk, D.A., Soyama, S., Mordiyuk, B.N., Martinez, S., Dzhemelinskyi, V.V., & Lamikiz, A. (2021). Comparison of advanced techniques for mechanical surface treatment of stainless steel parts. *Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта: матеріали XXII міжнародної науково-технічної конференції*, 86-89. <https://doi.org/10.20535/2409-7160.2021.XXII.240462>.
9. Sohrabpoor, H., Riedh Al Hamaoy, A., Issa, A., & Ul Ahad, I. (2017). Development of Laser Processing Technologies via Experimental Design. In book: *Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications*, (p. 707-729). <https://doi:10.1016/B978-0-08-101252-9.00024-8>.
10. Luxinar. (б. д.). CO<sub>2</sub> lasers for packaging and printing industries. <https://www.luxinar.com/news/co2-lasers-for-packaging-and-printing-industries/>.
11. Elenlaser. (б. д.). CO<sub>2</sub> laser marking for the packaging industry. Режим доступу: <https://elenlaser.com/blog/co2-laser-marking-packaging-industry.html>.
12. Mehrpouya, M., Lavvafi, H., & Darafsheh, A. (2017). Microstructural Characterization and Mechanical Reliability of Laser-Machined Structures. In book: *In Advances in Laser Materials Processing: Technology, Research and Applications*, (p. 731-761). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101252-9.00025-X>.