

УДК 621.375.826

ЛАЗЕРНЕ ГРАВІЮВАННЯ ЯК СУЧАСНИЙ СПОСІБ МАРКУВАННЯ

Савченко О.М.

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

***Анотація.** Наведено класифікацію маркування за способами і видами. Проведено експериментальні дослідження нанесення матричних кодів на картонні пакування з використанням лазерного вуглекислотного станка TS1390. Виявлено чотири типи дії лазерного випромінювання на поверхню оброблюваного матеріалу. Представлено етапи взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом.*

***Ключові слова:** ЛАЗЕРНЕ ГРАВІЮВАННЯ, МАРКУВАННЯ, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, ВУГЛЕКИСЛОТНИЙ ЛАЗЕРНИЙ СТАНОК.*

Вступ

Серед лазерних технологій, що використовуються в даний час у поліграфічній промисловості, поряд з лазерним розрізуванням, яке дозволяє виготовляти деталі різних типорозмірів і геометричної складності з широким діапазоном товщин і марок матеріалів, особливо ефективним виявилось застосування лазерного маркування паковань, сувенірної продукції та ін. Дана технологія дозволяє створювати чіткі позначення, наприклад, штрих-коди, QR-коди та інші символічні зображення. Лазерне маркування є ідеальним рішенням при роботі з крихкими матеріалами, де існує загроза їх руйнації. Завдяки тому, що лазер дозволяє наносити маркування без контакту з поверхнею, ймовірність псування виробу мінімізується.

До основних переваг лазерного маркування відноситься:

- захист від підробок;
- довговічність покриття та точність маркованого зображення, що визначаються високою видільною і роздільною здатністю;
- широкий спектр використовуваних матеріалів;
- висока якість обробки за рахунок мінімальних зон термічного впливу, зниження теплових деформацій, відсутності силового впливу інструменту на виріб;
- підвищення швидкості обробки (у кілька разів у порівнянні з традиційними методами маркування);
- скорочення в кілька разів витрат часу на підготовку виробництва при маркуванні нової продукції;
- висока продуктивність процесу при маркуванні виробів великих за розміром поверхонь чи великих тиражах;
- відсутність трафаретів та інших витратних матеріалів;

- можливість маркування деталей із заглибленнями у вигляді гострих кутів та переходів без радіусів;
- незважаючи на значні інвестиції в обладнання для лазерного маркування, вартість самого маркування набагато нижча з точки зору експлуатаційних витрат;
- екологічність процесу [1].

Як стверджують автори [2], на сьогодні в практиці існує багато різних методів, які можуть бути використані для досягнення високої якості на виробках з різноманітних матеріалів різної форми. І це змушує узагальнювати і систематизовувати в базі даних всі методи маркування конкретних лазерів і матеріалів для швидкого і гнучкого реагування виробників систем маркування на специфічні потреби кожного замовника. Для підвищення конкурентоспроможності виробів з дорогоцінних металів на ринку, у статті [3] досліджується інноваційне застосування технології лазерного гравіювання в дизайні виробів з дорогоцінних металів експериментальним шляхом. Зокрема, коригування параметрів лазерного гравіювання та зміна режиму векторного заповнення за допомогою програмного забезпечення для обробки комп'ютерної графіки та технології управління дозволяють досягти багаторівневого художнього ефекту в градаціях сірого. Ідеальне поєднання технології та мистецтва надає ширший простір для дизайну виробів із дорогоцінних металів. У роботі [4] досліджено вплив таких параметрів лазера як довжина хвилі, тривалість імпульсу, частота повторення та режим роботи на різних видах матеріалів. Також виявлено дію лазерного випромінювання з визначенням оптичних та фізичних властивостей матеріалу. Вітчизняними дослідниками здійснено детальний аналіз застосування лазерних систем у різних сферах [5], розглянуто основні типи сучасних лазерних комплексів для маркування [6], створено спрощену методику проектування багатокритеріальних операцій без втрати її роздільної здатності за рахунок використання реальних можливостей технологічного обладнання при лазерній обробці [7]. Температурний розподіл в матеріалі при опроміненні лазерним випромінюванням розглянуто автором [8] і встановлено зміну температурного розподілу при зміні режиму роботи лазера. Науковцями [9, 10] досліджені фізичні процеси при взаємодії лазерного CO₂-випромінювання з матеріалами, в тому числі і пластиковими при нанесенні на них зображень. Проаналізувавши наукові роботи, можна стверджувати, що лазерне маркування з успіхом використовується в різних сферах виробництва.

Мета та задачі дослідження

Кількість пропозицій вітчизняної лазерної техніки та сучасних лазерних технологій в Україні є вкрай недостатньою, що зменшує її конкурентоспроможність на світовому ринку і збільшує залежність країни від імпорту. Наближення вітчизняної продукції до світових стандартів потребує розширення розробок та впровадження сучасної лазерної техніки і

високоєфективних лазерних технологій гравіювання, різання, термообробки поверхні, наплавлення, зварювання та маркування. З огляду на важливість фундаментальних досліджень з лазерних технологій та необхідність посилення роботи з практичного використання їх результатів, доцільно проводити як аналітичні, так і експериментальні дослідження щодо подальшого розвитку цього напрямку.

Основна частина

Контрольно-ідентифікаційні позначення дають змогу не тільки визначити назву, дату виробництва та інші дані про товар, а й відстежити шлях продукту від виготовлення до списання чи продажу. Відповідний спосіб обирається в залежності від особливостей товару. Класифікація маркування за способами і видами представлена на рис. 1.

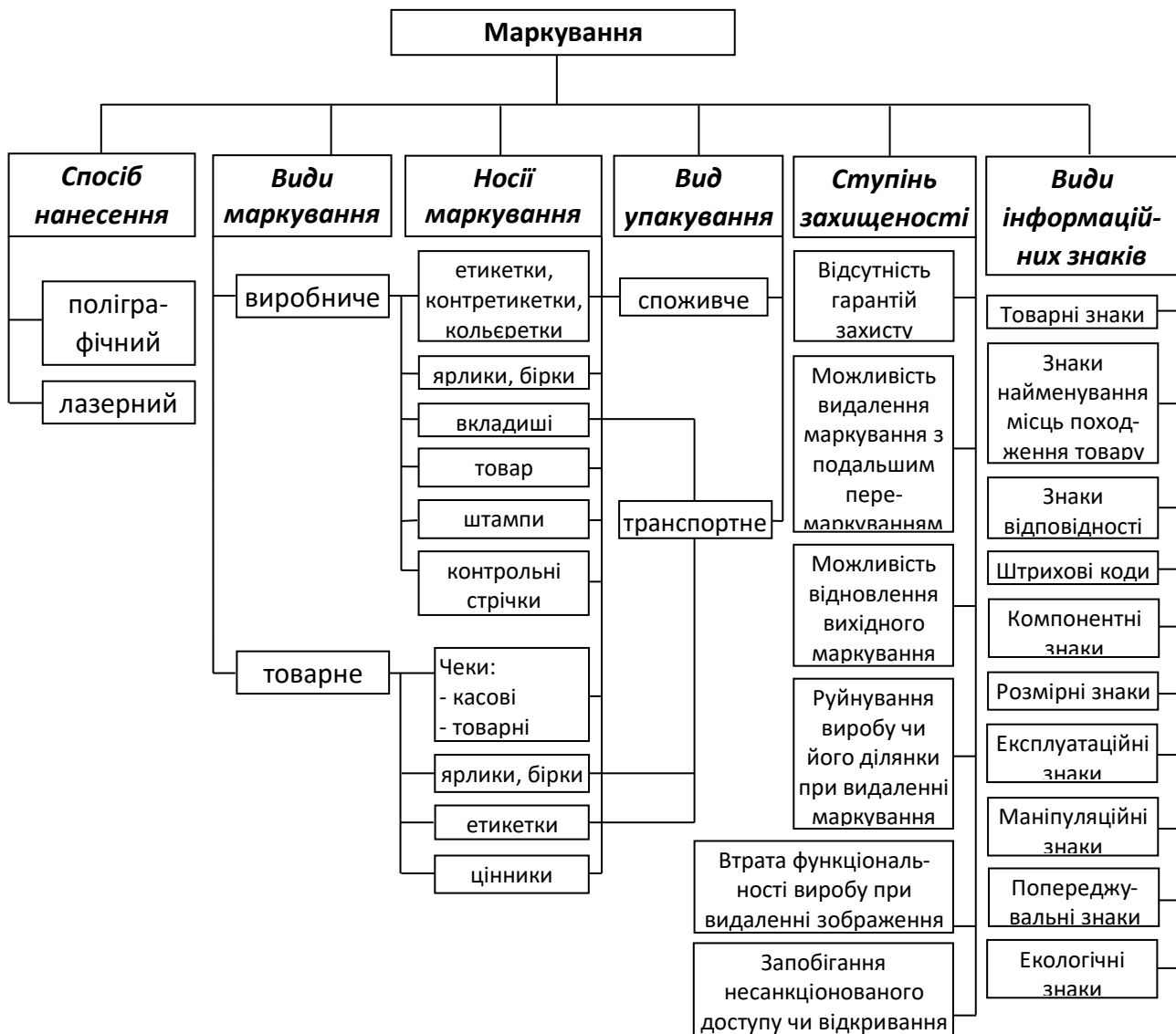


Рисунок 1– Класифікація маркування

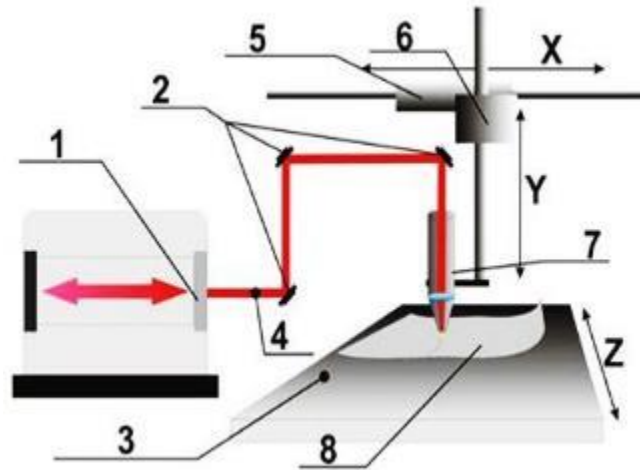


Рисунок 2 – Схема лазерної установки:

1 – генератор випромінювання (лазер); 2 – система дзеркал; 3 – рухомий робочий стіл лазерного маркування; 4 – промінь, який іде від генератора випромінювання через систему дзеркал до маркувальної головки; 5 – система руху маркувальної головки по осі X; 6 – система вертикального руху маркувальної головки; 7 – маркувальна головка; 8 – матеріал для маркування; X, Y – напрямки руху маркувальної головки; Z – напрямок руху рухомого стола

Останнім часом найбільш досконалим є лазерне маркування для нанесення інформаційних та ідентифікаційних написів з використанням лазерного випромінювання, яке в автоматизації комплектуючих, продукції та упакування займає важливу і невіддільну частину технології. Незважаючи на різноманіття лазерів, реальне комерційне застосування для маркування отримали системи з твердотільними лазерами довжиною хвилі 1,06 мкм і CO₂-лазерами (10,6 мкм). Схему лазерної установки зображено на рис. 2, конструкцію лазерної головки – на рис. 3.

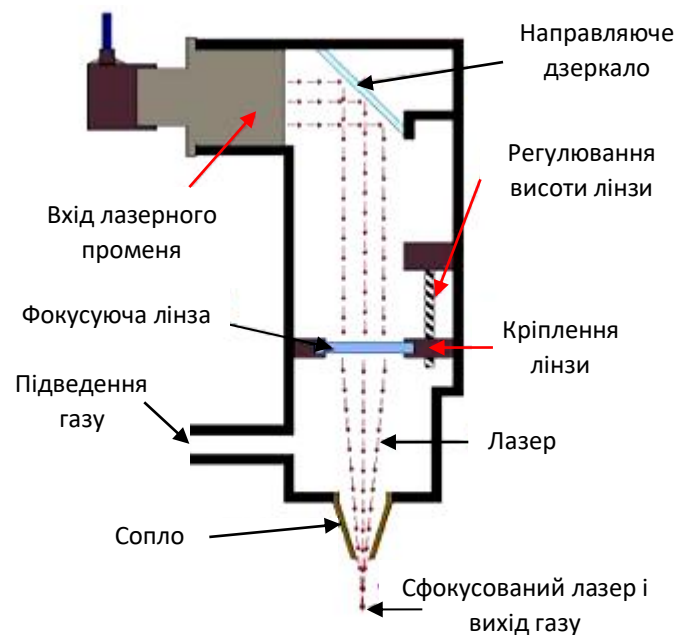


Рисунок 3 – Конструкція лазерної головки

Слід зазначити, що в промисловості застосовуються три основні типи лазерів: газовий, діодний та волоконний. Останній характеризується економічністю та великим терміном служби його головного компоненту. Діодний лазер, в свою чергу, відрізняється від усіх інших своєю підвищеною потужністю, яка може досягати 100 Вт. Такі характеристики стали можливі завдяки використанню кристалів Nd:YAG. Доволі часто маркування необхідно наносити не тільки на тверді поверхні, але і на м'які органічні, такі як тканина, шкіра чи дерево. Для цього використовуються газові вуглекислотні лазери, які ідеально підходять для роботи з керамікою, склом, паперовими та полімерними матеріалами.

Результати досліджень

У поліграфічній промисловості характерний досить широкий спектр матеріалів для лазерного маркування продукції. Найбільш використовуваними є пластикові, картонні, металеві та дерев'яні пакування, паперово-білові товари, акцидентна продукція та ін.

Задача маркування полягала в нанесенні матричних кодів на картонні пакування з використанням лазерного вуглекислотного станка TS1390 довжиною хвилі 10,6 мкм. Єдиною вимогою була візуальна читабельність. У зв'язку з цим, при мінімальній потужності 12 Вт швидкість маркування варіювалась від 140 до 240 мм/с. При цьому використовувався механізм не випаровування чи розплавлення матеріалу, а його руйнування. Підвищення потужності понад 14 Вт призводить до видалення верхнього фарбового і крейдованого шару (добре видно на бокових гранях коду) до появи кремового відтінку, тобто структури картону (рис. 4, а). Висока чіткість та читабельність забезпечується зниженням потужності до 12 Вт та збільшенням швидкості маркування до 240 мм/с для даного типу картону Arktika GC-2 (рис. 4, б).



Рисунок 4 – Маркування чорного картону Arktika GC-2 потужністю 14 Вт (а) та 12 Вт (б) і швидкістю маркування 240 мм/с

Контрастність та чіткість маркування залежить від кольору поверхні картонних пакувань. Можливі кольорові відтінки штрихових кодів визначаються кольором внутрішньої будови картону та його поверхневого шару. Максимальну контрастність та оптичну щільність можна отримати маркуванням на темному фоні картонів з двох- чи трьохшаровим крейдуванням лицевого шару. Контрастність маркування буде менша, якщо картон під шаром

фарби має тьмянний колір, тобто при використанні некрейдованих сортів картону. Яскраве маркування буде помітніше на фоні синього або чорного картону, і менше – на жовтому або бежевому фоні.

Проаналізувавши експериментальні дослідження, можна виділити чотири типи дії лазерного випромінювання на поверхню оброблюваного матеріалу (рис. 5).

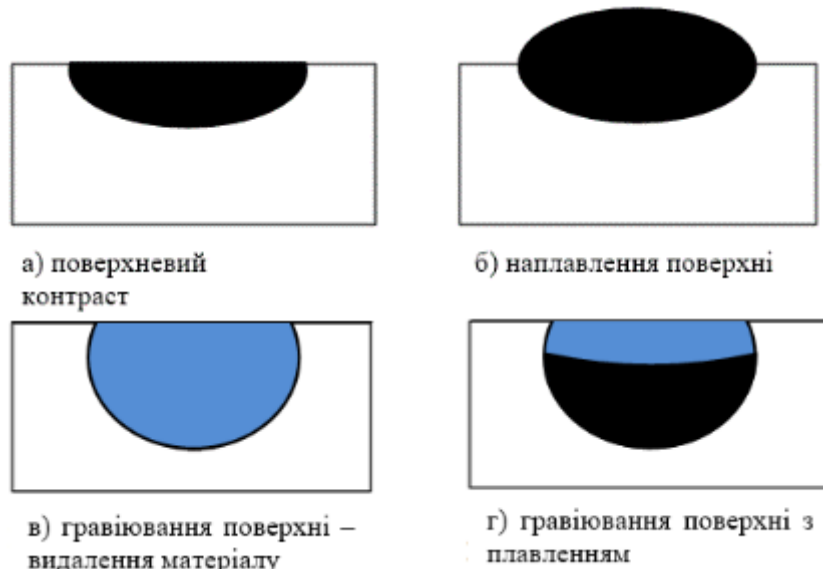


Рисунок 5 – Типи дії лазерного випромінювання на матеріал

Створення поверхневого контрасту (рис. 5а) характеризується високими швидкостями сканування променя по поверхні і/або короткою тривалістю імпульсів. Колір змінюється тільки на поверхні матеріалу, яка поглинає світло. Це створює видимий контраст з необробленою поверхнею матеріалу. Даний тип відомий як фотохімічний ефект. Таким способом часто маркуються етикетки товарів з використанням спеціального термопаперу, який змінює забарвлення під дією променя.

До переваг даного типу маркування відноситься:

- низька потужність, необхідна для створення рисунка;
- компактність технологічного обладнання;
- надвисоку продуктивність (швидкість сканування променя може досягати 1500 мм/с);
- можливість отримання високої роздільної здатності;
- безконтактність обробки.

Недоліками є:

- необхідність застосування для маркування спеціальних матеріалів;
- руйнування відбитка з часом під дією сонячного світла, температури і ін.

Наплавлення поверхні (рис. 5б) – більш повільний процес, при якому матеріал досягає температури плавлення, і в результаті хімічного розпаду ефекти окислення або зміна в поверхневій морфології забезпечує видиме маркування. Рідко застосовується при маркуванні металевих поверхонь через низький контраст. Наприклад, біле маркування на темних пластмасових

поверхнях з'являється через спінювання пластмаси, обробленої лазерним променем.

Пояснюється тим, що лазерний промінь плавить пластмасу, в якій створюються бульбашки газу внаслідок згоряння вуглецю з утворенням CO_2 або безпосереднього теплового розкладання пластмаси. Бульбашки газу піднімаються на поверхню, утворюючи піну. До вспінювання схильні поліолефіни і поліетилен високої щільності. Основним недоліком даного методу є низька зносостійкість маркування.

Гравіювання поверхні або повне видалення матеріалу (рис. 5в) – найповільніший процес маркування, оскільки матеріал випаровується. Технологія отримала широке застосування в усіх областях виробництва. У мікроелектроніці застосовується для маркування заготовок, виробів і оснащення на всіх стадіях розробки і виробництва, наприклад, для кремнієвих пластин. Значну роль в даному типі маркування відіграють параметри оброблюваного матеріалу. Найбільш істотні з них – теплопровідність, прихована теплота випаровування і коефіцієнт відбиття лазерного випромінювання. Якщо виходити з того, що весь шар матеріалу, який необхідно видалити за допомогою лазера, випаровується, то кількість даного матеріалу буде обмежуватися величиною прихованої теплоти випаровування. Максимальна глибина шару матеріалу, який випаровується, визначається за формулою:

$$D = \frac{E_0}{A \cdot \rho \cdot (c \cdot (T_1 - T_0) + L)},$$

де c – питома теплоємність;

T_1 – температура кипіння;

T_0 – температура навколишнього середовища;

L – прихована теплота випаровування;

A – площа, яка підлягає опроміненню;

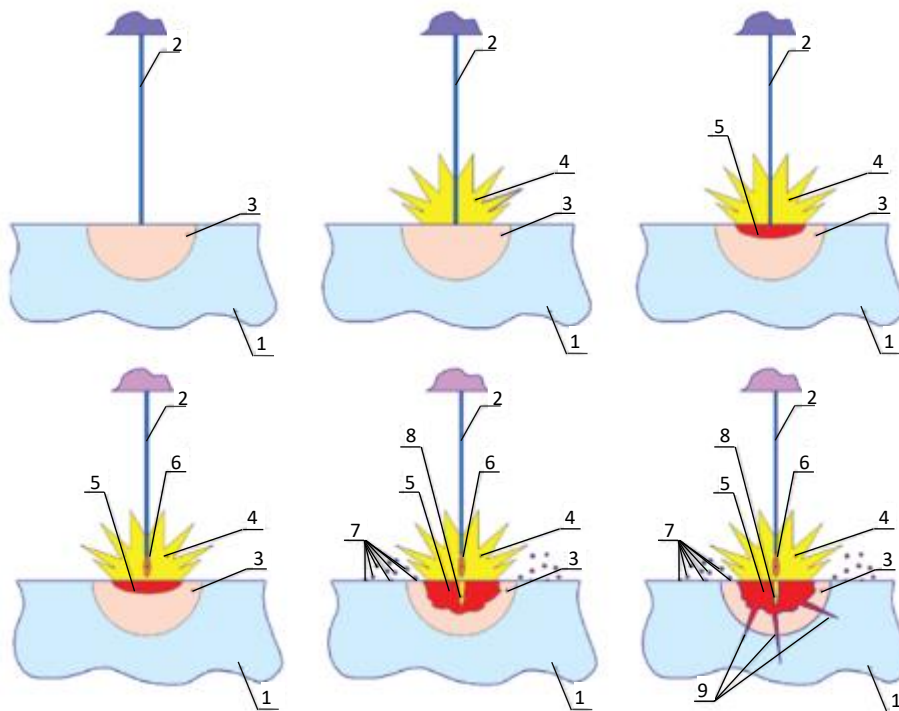
ρ – щільність матеріалу;

E_0 – енергія, яка утворюється під дією лазерного імпульсу.

Формула безпосередньо витікає із закону збереження енергії. Вся енергія лазерного імпульсу поділяється на ту, яка поглинається E_0 та відбивається. Формула дає тільки приблизну оцінку, тому важливо розуміти, що теплофізичні параметри матеріалів змінюються в залежності від температури взірця і довжини хвилі випромінювання.

Найсильніший вплив на форму маркованого зображення має модовий склад (розподіл енергії всередині пучка) та потужність випромінювання. При цьому залежність дуже складно описати аналітично, оскільки на різних рівнях щільності енергії процеси протікають по-різному. При повільному нагріванні безперервним лазером найбільш важливим критерієм є відведення тепла вглибину матеріалу. У цьому випадку крапка випаровування виходить великою. Для плоских зразків велику роль відіграє товщина. Якщо обсяг енергії, що

подається, перевищує обсяг енергії, що відводиться теплопередачею, відбувається плавлення матеріалу. Зі збільшенням інтенсивності (тобто переході до імпульсних лазерів), істотно впливає вторинне випромінювання з поверхні і, як наслідок, відведення енергії в навколишнє середовище. При досягненні рівня 10^5 Вт/см² процес починає проявляти нові властивості. Це пов'язано з тим, що над поверхнею зразка утворюється хмара плазми, яка частково екранує поверхню. Втрати енергії в цьому випадку можуть досягати 40%. Для того, щоб уникнути виникнення такого явища, слід робити невелику паузу при подачі імпульсів лазера. Подальше зростання питомої енергії випромінювання активує процес механічного руйнування матеріалу спільно з термічним, утворюючи мікробух. Вибухи сприяють витісненню всього матеріалу, який знаходиться в рідкій фазі, і розбризкуванню його на значні відстані, іноді перевершуючи діаметр пучка обробки. Етапи взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом зі збільшенням питомої енергії випромінювання представлені на рис. 6.



- | | |
|--|--|
| 1 – вірець | 6 – хмара плазми |
| 2 – лазерне випромінювання | 7 – бризки розплавленого матеріалу вірця |
| 3 – зона активного тепловідведення всередині матеріалу | 8 – зона локально випаруваного матеріалу |
| 4 – зона відведення енергії у внутрішнє середовище | 9 – тріщини, які утворюються в результаті локальних мікробухів |
| 5 – зона локального розплавлення матеріалу | |

Рисунок 6 – Етапи взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом

Крім того, різке нагрівання стимулює перебіг різних хімічних реакцій в зоні дії. При роботі без створення особливого середовища превалюють процеси окислення. Цей фактор відіграє істотну роль для маркування виробів, оскільки

дозволяє отримувати хімічні поєднання кольору, відмінного від основного матеріалу. Найчастіше цей шар міцно утримується на поверхні, забезпечуючи якість зображення та його читабельність.

Гравіювання поверхні з плавленням (рис. 5, г) – комбінація видалення матеріалу з плавленням, яке відбувається на поверхні виробу чи деталі.

До рекомендацій щодо вибору обладнання можна віднести те, що найбільш зручними є установки з довжиною хвилі видимого або УФ-спектру. Важливим параметром обладнання є стабільність потужності лазера. Незначне відхилення потужності в 5-7% може спричинити пропалювання матеріалу, знижуючи корозійну стійкість виробу або ж зробити маркування нечитабельним.

Із вищесказаного видно, що лазер – це універсальний інструмент маркування, який дає можливість використання різноманітних механізмів створення рисунків, таких як, стимуляція хімічної реакції, розплавлення і змішування матеріалів, випаровування матеріалу, руйнування його верхнього шару та ін.

Висновки

В останні роки технологія лазерного маркування все більш широко використовується в поліграфії і може успішно застосовуватися для багатьох матеріалів: пластику та гуми, паперу і картону, дерева та шкіри. На сьогодні лазерне маркування займає 90% ринку. У порівнянні з традиційним механічним маркуванням (голкоударне, тиснення (вдавлювання), висікання, перфорація, гравіювання та використання штампу), термічною дією, струменевим і термотрансферним друком, лазерне маркування відрізняється низькою вартістю та високою гнучкістю і повністю керований комп'ютерною системою. Завдяки поєднанню лазерних та комп'ютерних технологій користувач може реалізувати нанесення інформаційних та ідентифікаційних даних без використання витратних матеріалів шляхом введення через комп'ютер та швидким корегуванням їх дизайну у будь-який час, що істотно замінює традиційний процес виробництва модулів та надає зручні інструменти гнучкості і скорочення циклу виготовлення продукту.

Список літератури.

1. Eight Advantages for Laser Marking. <https://www.gboslaser.com/knowledge/eight-advantages-laser-marking>.
2. Lazov, L., Deneva, H., & Narica, P. (2015). Laser Marking Methods. *Proceedings of the 10th International Scientific and Practical Conference*, (1), 108-115. 10.17770/etr2015vol1.221.
3. Feng, Lyu, & Fan, Yang. (2021). Research on the Application of Laser Engraving Technology in the Design of Precious Metal Crafts. *2nd International Conference on Intelligent Design (ICID)*, 133-137. 10.1109/ICID54526.2021.00034.
4. Hubeatir, K.A., AL-Kafaji, M.M., & Omran, H.J. (2018). A Review: Effect of Different Laser Types on Material Engraving Process. *Research & Reviews: Journal of Material Sciences*, 6(4), 210-217. 10.4172/2321-6212.1000234.

5. Гринчишин, Т.М., & Кіт, Г.В. (2014). Застосування оптичних лазерних систем та перспективи їх подальшого розвитку. *Вісник НУ «Львівська політехніка»: Інформаційні системи і мережі*, (805), 96-105. <https://ena.lpnu.ua/handle/ntb/26640>.
6. Пухальська, Г.В., & Порвін, І.Е. (2020). Лазерне маркування. *Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 13–17 квітня 2020 р.* – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2020. – С. 21-22.
7. Котляров, В.П., & Киященко, О.М. (2017). Особливості використання лазерної технології в умовах сучасного стану промисловості України. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»: міжнародний науково-технічний журнал*, 1(111). 94-105. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/24092>.
8. Габ'ян, Л. (2013). Розрахунок напружень в матеріалах під дією лазерних імпульсів. *Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання: матеріали VI всеукр. студ. науково-техн. конф., 25-26 квітня 2013 року.* – Т.: ТНТУ. – Т. 1. – С. 241. <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/9968>.
9. Савченко, О.М. (2020). Фізичні процеси при взаємодії лазерного CO₂-випромінювання з матеріалом. *Наукові записки: Зб. наук. праць*, 2(61), 86-93.
10. Гавенко, С.Ф., & Савченко, О.М. (2015). Дослідження процесів взаємодії лазерного випромінювання з пластиковими матеріалами при нанесенні на них зображень. *Тези доповідей науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу, наукових працівників і аспірантів.* – С. 55.