

**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ, АВТОМАТИКИ І ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри електротехніки,
електромеханіки та електротехнологій**

К.Т.Н., доц. Окушко О.В.

(підпис)

« » _____ 2025 р.

З А В Д А Н Н Я

до виконання магістерської кваліфікаційної роботи студенту

Яценку Кирилу Ярославовичу

(прізвище, ім'я, по-батькові)

Спеціальність 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Орієнтація освітньої програми освітньо-професійна

(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Тема магістерської кваліфікаційної роботи: **«Розроблення та дослідження електротехнологічного комплексу лазерного маркування с.г.продукції»**

затверджена наказом від 18.11.2024 р. № 2061 “С”

Термін подання завершеної роботи на кафедру 14.11.2025

Вихідні дані до магістерської роботи:

- а) Результати науково-дослідницької роботи кафедри ЕЕЕ.
- б) Публікації співробітників кафедри ЕЕЕ.
- в) Система ПЗР і ТО електрообладнання сільськогосподарських підприємств.
- г) Нормативні документи: ПУЕ, ПТЕЕС та ПБЕЕС, ДСТУ, ДБН тощо.

Перелік питань, що підлягають дослідженню:

- а) **Аналітична частина.** Аналіз характеристик і стану науково-виробничої задачі маркування сільськогосподарської продукції
- б) **Технологічна частина.** Обґрунтування і вибір технологічного обладнання .
- в) **Електротехнічна частина.** Дослідження процесу і обладнання для лазерного маркування різних видів продукції
- г) Розробка питань керування та енергоефективності процесу обробки.
- д) **Дослідницька частина.** Розроблення системи керування роботою лазерної установки за видами продукції
- е) **Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.**

Перелік графічного матеріалу (за потреби) _____

Дата видачі завдання «15 квітня» 2025 р.

**Керівник магістерської
кваліфікаційної роботи**

_____ (підпис)

Червінський Л.С.

(ПІБ)

Завдання прийняв до виконання

_____ (підпис)

Яценко К.Я.

(ПІБ)

ЗМІСТ

Вступ	8
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І СТАНУ НАУКОВО-ВИБРОБНИЧОЇ ЗАДАЧІ МАРКУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ.....	9
1.1 Основні фізичні процеси лазерних технологій.....	9
1.2 Особливості лазерного випромінювання як інструменту.....	10
1.3 Основні фізичні процеси лазерних технологій.....	12
1.4 Лазерне випромінювання як інструмент дії.....	15
РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО МАРКУВАННЯ	18
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБЛЕННЯ ЛАЗЕРНОГО МАРКУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ.....	24
3.1 Загальна характеристика лазерного маркування.....	24
3.2 Застосування лазерного кольорового маркування.....	27
3.3 лазерне маркування полімерних виробів.....	32
3.4 Обґрунтування та розробка маркування продуктів харчування.....	34
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ.....	51
4.1 Аналіз методів очищення поверхні.....	51
4.2 Фізичні основи лазерного очищення поверхні.....	52
4.3 Вибір обладнання та режимів для лазерного очищення.....	62
4.4 Розроблення режимів лазерного очищення від іржі і технологічних забруднень.....	67
Висновки.....	76
Список літератури.....	78

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

- $\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності;
 d – діаметр повітропроводу;
 E – нормативна освітленість;
 g – прискорення вільного падіння;
 $I_{\text{РОЗР.}}$ – розрахунковий струм;
 K_3 – коефіцієнт запасу;
 K_0 – коефіцієнт одночасності, який залежить від кількості споживачів;
 m – час роботи;
 P – потужність лазера,
 $Q_{\text{МАХ}}$ – реактивна потужність на вводі;
 Q – потрібна продуктивність лазерної установки на добу;
 q – кількість на годину;
 S – періодичність імпульсів ;
 $U_{\text{К}\%}$ – напруга короткого замикання трансформатора;
 $U_{\text{Н}}$ – номінальна напруга мережі;
 V – об'єм приміщення;
 z – коефіцієнт нерівномірності освітлення;
 швидкості;
 $\Delta P_{\text{КЗ}}$ – втрати короткого замикання;
 ΔU – втрата напруги;
 ПР – поточний ремонт;
 ТП – трансформаторна підстанція.

РЕФЕРАТ

Магістерська кваліфікаційна робота на тему: *«Розроблення та дослідження електротехнологічного комплексу лазерного маркування сільськогосподарської продукції»* стор. 79 рис. 20 табл. 37. бібл. 27.

Актуальність магістерської роботи Розроблення методів та засобів направлених на підвищення якості та ефективності маркування продукції аграрної сфери є актуальною проблемою, яка передбачає необхідність дослідження і вибору ефективної технології маркування сільськогосподарської продукції різного спрямування.

Мета роботи полягає у розробленні та дослідженні енергоефективного електротехнологічного комплексу лазерного маркування сільськогосподарської продукції, яка б відповідала сучасним вимогам щодо надійності та якості маркування. Окремо необхідно виділити та обґрунтувати заходи з енергоощадності, які б дозволили підвищити енергоефективність підприємства.

Задачі магістерської роботи. Для досягнення поставленої мети треба вирішити наступні задачі: проаналізувати можливості і напрямки використання лазерного випромінювання; здійснити проектні рішення при виборі лазерів для маркування, створенні маркувальної установки для різних видів сільськогосподарської продукції, тощо; забезпечити якість нанесення маркеру на конкретні види продукції; вибрати та обґрунтувати заходи з енергоощадності на підприємстві.

Предметом досліджень магістерської роботи є процеси лазерного маркування різних видів продукції сільськогосподарського виробництва.

Об'єктом дослідження є режими роботи маркувальної установки.

Методи дослідження. При виконанні роботи, в основному, застосовуються експериментальні та аналітичні методи розрахунку, більша частина яких реалізується за допомогою сучасного програмного забезпечення на ПК.

Наукова новизна. Науковою новизною роботи є режимні рішення по

організації процесу маркування і реалізації заходів з енергозбереження, що отримані на основі проведеного аналізу і з застосуванням засобів САПР і які дозволили підвищити енергоефективність підприємства і досягти оптимальних характеристик роботи.

Апробація результатів магістерської роботи. Матеріали магістерської роботи доповідались на конференціях та семінарах кафедри «Електротехніки, електромеханіки та електротехнологій » та конференціях ННІ енергетики, автоматики та енергозбереження НУБІП України. Є тези доповідей.

ВСТУП

Слово ЛАЗЕР є транскрипцією англійської абрєвіатури LASER, що відображає фізичну сутність процесу генерації лазерного випромінювання Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – посилення світла за допомогою вимушеного випромінювання [1]. Ось що говорить про лазерну обробку один із винахідників лазерних випромінювачів академік М.Г.Басов:

«Лазерний промінь – це унікальне теплове джерело, здатне нагріти опромінювану ділянку деталі до високих температур за такий малий час, протягом якого тепло не встигає «розтікатися». Ділянка, що нагрівається, може бути при цьому розм'якшеною, рекристалізованою, розплавленою, нарешті, її можна випаровувати. Дозуючи теплові навантаження шляхом регулювання потужності і тривалості лазерного опромінення, можна забезпечити практично будь-який температурний режим і реалізувати різні види обробки. Лазерний нагрів використовується для поверхневого гартування і легування металів, для плавлення при зварюванні, для плавлення і випаровування з викидом парів при різанні і свердлінні» [3].

Таким чином, лазерне випромінювання – це різновид електромагнітного випромінювання оптичного діапазону, яке, маючи ряд унікальних фізичних властивостей, набуло широкого застосування в різних галузях науки і техніки. Лазерні технології останнім часом знаходять все більш широке застосування в промисловості, тому що розвиток сучасного виробництва зумовлює все зростаюче впровадження наукомістких технологій. Використання лазерної обробки матеріалів дозволяє забезпечити високу якість одержуваних виробів, задану продуктивність процесів, екологічну чистоту, а також економію людських і матеріальних ресурсів. В результаті використання лазерного променя для обробки матеріалів з'являється можливість внесення докорінних змін у технологію виготовлення виробів.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І СТАНУ НАУКОВО-ВИРОБНИЧОЇ ЗАДАЧІ МАРКУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ

1.1. Фізичні основи лазерного випромінювання

Різниця між світлодіодами і лазерами *в принципі люмінесценції* LED використовує спонтанне випромінювання носіїв, введених в активну область, для рекомбінації світла, тоді як LD рекомбінує світловипромінювання за допомогою стимульованого випромінювання. Напрямок і фаза фотонів, які випромінює світлодіод, є випадковими, а фотони, що випромінюються лазерним діодом, мають однаковий напрямок і фазу.

Світлодіод - це абревіатура від Light Emitting Diode. Він широко зустрічається в повсякденному житті, наприклад, індикатори побутової техніки, протитуманні фари на задній частині автомобілів тощо. Найбільш помітною особливістю світлодіодів є довгий термін служби та висока ефективність фотоелектричного перетворення. Причина полягає в тому, що в PN-переході деяких напівпровідникових матеріалів інжектовані неосновні та мажоритарні носії будуть вивільняти надлишок енергії у вигляді світла, коли вони рекомбінують, тим самим безпосередньо перетворюючи електричну енергію в світлову. При зворотній напрузі, прикладеній до PN-переходу, важко ввести неосновні носії, тому він не випромінює світло. Такий діод, виготовлений за принципом інжекційної електролюмінесценції, називається світлодіодом, широко відомим як світлодіод.

LD — англійська абревіатура від лазерного діода. Фізична структура лазерного діода полягає в розміщенні шару світлоактивного напівпровідника між переходами світлодіодів. Торцева поверхня світлодіода після полірування виконує функцію часткового відбиття, утворюючи таким чином оптичну резонансну порожнину. У разі прямого зміщення світлодіодний перехід

випромінює світло і взаємодіє з оптичним резонатором, щоб додатково стимулювати випромінювання однохвильового світла з переходу. Фізичні властивості цього світла пов'язані з матеріалом. Принцип роботи напівпровідникового лазерного діода теоретично такий же, як і газового лазера. Лазерні діоди широко використовуються в малопотужних оптоелектронних пристроях, таких як CD-приводи на комп'ютерах і друкуючі головки в лазерних принтерах.

Різниця між ними в принципі, структурі та ефективності.

(1)*Різниця в принципі* роботи: LED використовує спонтанне випромінювання носіїв, введених в активну область, для рекомбінації світла, тоді як LD рекомбінує світловипромінювання за допомогою стимульованого випромінювання.

2) *Різниця в архітектурі*: LD має оптичну резонансну порожнину для того, щоб генеровані фотони коливалися та посилювалися в порожнині, тоді як світлодіод не має резонансної порожнини.

3) *Різниця в ефективності*: світлодіод не має критичних значень характеристик, а спектральна щільність на кілька порядків вище, ніж у LD. Вихідна світлова потужність світлодіода мала, а кут розбіжності великий.

1.2. Напрямки застосування лазерного випромінювання

Лазерна обробка успішно застосовується в промисловості і інших галузях, зокрема в легкій та харчовій виробництвах. Висока продуктивність, легкість транспортування енергії лазерного випромінювання в просторі і простота автоматизації процесу є безсумнівними перевагами лазерної обробки матеріалів. Внаслідок цього в останні роки спостерігається підвищений інтерес до використання лазерів для обробки матеріалів у всіх промислово розвинених країнах.

Перспективним є використання лазерів в процесах, де з його допомогою

можливо виконання цілого ряду операцій одночасно або в одному технологічному циклі. Перевагою лазерної техніки є простота управління лазерним пучком, висока точність обробки і оперативність, відсутність механічного контакту, можливість обробки важкодоступних деталей, можливість створення вузьких каналів, спрямованих під кутом до оброблюваної поверхні.

Використання лазерів в першу чергу передбачається в тих технологічних процесах, які нездійсненні за допомогою інших джерел енергії або їх здійснення пов'язане з великими енергетичними та часовими витратами.

Останнім часом широко використовується лазерна техніка в операціях, де обробка матеріалів за допомогою лазерів здійснюється з меншими енергетичними і трудовими затратами (наприклад, для обробки крихких, твердих і термостійких матеріалів) в порівнянні з іншими технологіями.

У багатьох процесах виявилось можливим поєднувати лазерний вплив з іншими видами енергії, наприклад, з дією плазми електричного розряду, вибухової хвилі, ультразвуку, механічного та хімічного впливу. Це значно розширило коло завдань, що вирішуються за допомогою лазерної техніки. Дуже часто лазерна обробка проводиться в присутності хімічних, газових та інших робочих середовищ, що дозволяє проводити ряд робіт, нездійснених в інших технологіях.

Необхідно відзначити, що в технічно розвинених країнах світового співтовариства лазерні технології вже увійшли до багатьох галузевих стандартів, що робить принципово неможливим участь у міжнародних коопераціях промислових підприємств, не оснащених лазерним обладнанням.

1.3. Основні фізичні процеси лазерних технологій

При взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною відбувається ряд теплофізичних процесів, які схематично представлені на рис.

1.1.

Характер цих процесів, а отже, і результат цієї взаємодії сильно залежать від коефіцієнта поглинання матеріалу на довжині хвилі випромінювання.

Лазерне випромінювання, поглинається відповідно до експоненціального закону Бугера- Ламберта на оброблюваній поверхні

$$I(x) = I_0 \exp(-\alpha x) , \quad (1.1)$$

де $I(x)$ – інтенсивність лазерного випромінювання, що проникає в матеріал на глибину x ;

I_0 – інтенсивність падаючого на об'єкт лазерного випромінювання (для спрощення внесок відбиття не враховується).

Тепло, що при цьому виділилось, поширюється в глиб матеріалу за рахунок теплопровідності (рис. 1.1, а).після того, як температура поверхні досягає точки плавлення, починається поширення межі рідкої фази в глиб матеріалу (рис. 1.1, б).

При подальшому опроміненні матеріалу продовжується процес нагріву до температури випаровування (кипіння). Далі випромінювання поглинається основним матеріалом, і, якщо інтенсивність недостатньо висока, матеріал плавиться, випаровується, а пари іонізуються.

Якщо інтенсивність лазерного випромінювання велика, то в результаті випаровування утворюється високо температурна непрозора плазма. Хмара плазми поглинає падаюче лазерне випромінювання і екранує поверхню зразка, перешкоджаючи тим самим подальшому впливу лазера на речовину (рис. 1.1, г). Це негативний ефект і його потрібно уникати в процесі лазерної обробки матеріалів. Тобто, при побудові технологічного процесу, що реалізується за допомогою лазера, необхідно враховувати теплофізику лазерного нагрівання.

Більшість лазерних технологій заснована на тепловій дії випромінювання, тобто передбачається необхідність нагрівання об'єкта впливу

до заданої температури. Тому головною характеристикою лазера, що використовується в таких технологіях, є його потужність.

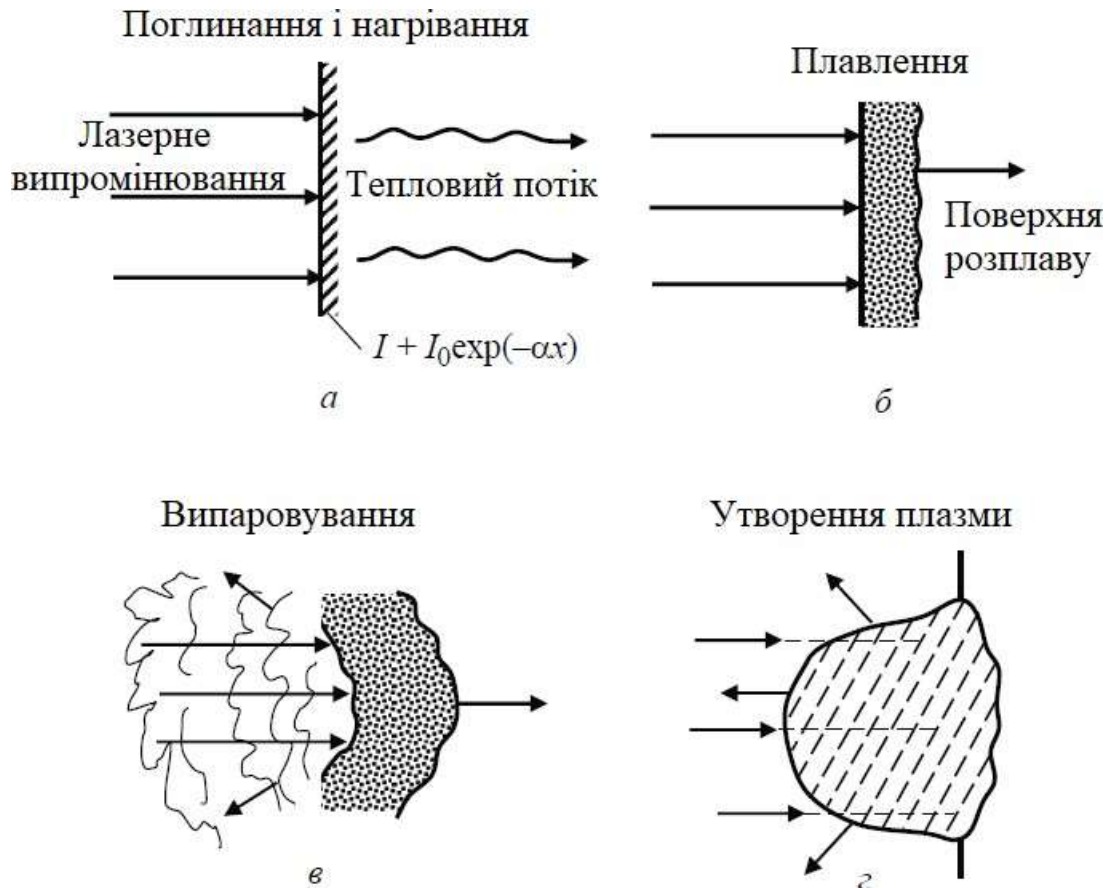


Рис. 1.1. Приклади основних фізичних процесів, що виникають при взаємодії лазерного випромінювання з опромінюваною речовиною

Температура T , до якої нагрівається об'єкт обробки, визначається щільністю поглиненої потужності випромінювання q , яка залежить від потужності випромінювання P_0 , її розподілу за опромінюваною поверхнею і поглинальної здатності об'єкта A .

Зокрема, при рівномірному розподілі щільності потужності в межах опроміненої зони S – площа опроміненої зони на оброблюваній поверхні.

Нагрівання тіла описується диференціальним рівнянням теплопровідності, яке при сильному поглинанні випромінювання, коли глибина проникнення світла в матеріал $\delta = 1/\alpha$ (α – показник поглинання світла) багато менше товщини прогрітого шару \sqrt{at} (a – температуропровідність матеріалу, t

– тривалість імпульсу), наприклад, для металів у видимому діапазоні і для скла в середньому ІЧ-діапазоні ($\lambda \sim 10$ мкм, $\alpha \approx 10^{-5} - 10^{-6}$ см

При розрахунку порогових значень щільності потужності випромінювання зручно використовувати формулу, що визначає максимальну температуру тіла при нагріванні його лазерним випромінюванням (на поверхні тіла в центрі опроміненої області у вигляді кола радіуса r_0 в момент закінчення його дії), яку отримуємо при вирішенні системи рівнянь для випадку постійної в часі і за площею опроміненої зони щільності потужності випромінювання q .

Довжину хвилі лазерного випромінювання вибирають таким чином, щоб забезпечити максимальне його поглинання речовиною. Наприклад, для обробки металів використовують випромінювання видимого та ближнього інфрачервоного діапазону, скла – середнього ІЧ-діапазону та ін

Тривалість дії випромінювання визначає температуру об'єкту, що нагрівається, темп нагрівання та охолодження, величину температурних градієнтів і розміри прогрітих шарів в матеріалі.

Тривалість дії лазерів, що працюють в безперервному режимі, залежить від швидкості сканування $V_{ск}$ лазерного пучка по поверхні матеріалу

Важливою характеристикою лазерного випромінювання є ступінь його когерентності. При обробці поверхні матеріалу когерентним випромінюванням можливе формування на ній дифракційної картини, а також періодичної поверхневої структури, що виникає при утворенні поверхневих електромагнітних хвиль.

Велике значення монохроматичність та когерентність випромінювання має в багатопроточних лазерних системах, коли при узгодженні фаз випромінювання окремих лазерів сумарна інтенсивність багатопроточної системи значно перевищує суму інтенсивності випромінювання окремого лазера ю. Когерентність випромінювання пов'язана із спрямованістю пучка випромінювання, його монохроматичністю і поляризацією.

Головним параметром є монохроматичність випромінювання.

Монохроматичність лазерного випромінювання характеризує властивість лазера випромінювати у дуже вузькому діапазоні довжин хвиль. Ступінь монохроматичності випромінювання залежить від властивостей активного середовища і характеристик резонатора фотонів збудження.

Часто при лазерної обробки необхідно враховувати поляризацію випромінювання, зокрема, в технологічних процесах, при яких відбувається багаторазове відбиття випромінювання під кутами, близькими до кута Брюстера. Прикладом такого технологічного процесу є різання металевих матеріалів великої товщини [2].

1.4. Лазерне випромінювання як інструмент дії

Лазерний промінь має значно вищу інтенсивність і точкову потужність в порівнянні зі звичайним джерелом світла. Через це при попаданні його на поверхню матеріалу, що опромінюється виникають відмінні умови взаємодії.

Зокрема є короткочасність впливу високої інтенсивності потужності для імпульсних лазерів (умова дії: в тонкому поверхневому шарі на довжині поглинання повинна виділятися велика частка енергії падаючого випромінювання).

Глибина прошарку, в якому поглинається випромінення лазера, становить приблизно 10^{-5} см, при цьому градієнт температури досягає 10^8 К/см, і швидкість зміни в часі 10^{10} К/с.

Причому, починаючи з певної щільності потужності лазерного випромінювання, поглинання може зрости значно більше, ніж це можна очікувати за рівнянням (1.1). Внаслідок нелінійності процесів взаємодії між лазерним світлом і опроміненою зоною з'являється аномальне поглинання.

Навіть, при перевищенні порогової інтенсивності непоглинаючі речовини стають також поглинаючими. Зокрема, до початку впливу лазерного випромінювання (початкова фаза менше 10^{-7} с) часткове відбиття може

змінитися поглинанням. Слід зазначити, що ця критична інтенсивність залежить від енергії фотонів, довжини хвилі лазерного випромінювання, геометричних характеристик лазерного пучка і від матеріалу що обробляється

Для збільшення ефективності лазерної обробки потрібно перевести речовину в поглинаючий стан під дією потужного первинного імпульсу.

Іншими можливостями зміни поглинаючих властивостей поверхні є матування поверхні, нанесення неметалевого шару (термічне оксидування, анодування, хімічна обробка), нанесення порошків кольорових пігментів[4].

Я показує практика, поглинання в металах відбувається в шарку товщиною $10^{-6} - 10^{-5}$ см. Для великого числа діелектриків і напівпровідників лазерне випромінювання не можна розглядати як поверхневе джерело.

Видалення матеріалу з оброблюваного місця деталі стає можливим завдяки утворенню парової та рідинної стану матеріалу під високою температурою. Падаюча на оброблюваний виріб енергія приводить до локального випаровування металу. Зона випаровування локалізується під вихідною поверхнею виробу на глибині 0,05 – 0,1 мкм. При обробці

Критичним є необхідність урахування відбивної здатності поверхні матеріалу ,що обробляється. Парова хмара, що утворюється при випаровуванні, діє як розсіююча лінза зі змінною у часі фокусною відстанню в міліметровому діапазоні і тим самим впливає неконтрольованим чином на умови фокусування і якість обробки.

Висновки до розділу. Для багатьох обробок оптичним лазером з видаленням матеріалу з місця обробки більш вигідним є імпульсний режим роботи лазера, при якому матеріал, що видаляється в паровій або рідкій фазі із зони обробки, не робить оптичної дії на падаюче потужне лазерне випромінювання. Практикою доведено, що необхідні коротко діючі імпульси ($10^{-6} - 10^{-9}$ с). Важливою характеристикою є також структура і форма імпульсів.

РОЗДІЛ 2

ДОСЛІДЖЕННЯ УСТАТКУВАННЯ ТА ВИБІР РЕЖИМІВ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ

В даний час лазерні технології знайшли дуже широке застосування у виробництві. Обладнання, що використовується для лазерної обробки матеріалів, надзвичайно різноманітне. У ньому є пристрої зовнішньої оптики, керовані столи, маніпулятори, роботи для переміщення виробу під час обробки, а також програмне забезпечення, яке необхідне для реалізації конкретної технології. Узагальнена функціональна схема технологічної лазерної установки для обробки матеріалів представлена на рис. 2.1 [4].

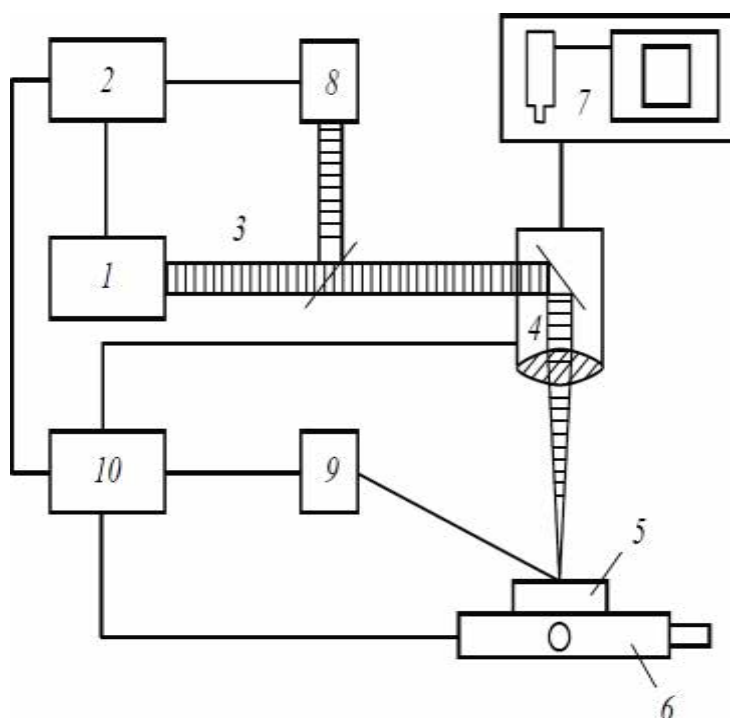


Рис. 2.1. Узагальнена функціональна схема технологічної лазерної установки:

1 – лазерний випромінювач, 2 – блок стимуляції випромінювання лазера, 3 – вихідний пучок лазерного випромінювання, 4 – фокусуєча оптична система, 5 – деталь, що обробляється, 6 – стіл для просторового руху деталі, 7 – система візуалізації лазерної обробки, 8 – система контролю параметрів лазера, 9 – система контролю технологічних параметрів, 10 – програмуєчий мікропроєесор

Фокусуєча оптична система служить для фокусування лазерного пучка на поверхні оброблюваного об'єкта в світлову пляму такого розміру, що дозволяє забезпечити необхідний рівень щільності потужності, достатній для виконання технологічної операції. Для більш ефективної роботи лазера вона повинна забезпечити максимально можливе використання енергії лазерного випромінювання з урахуванням втрат на всіх оптичних елементах лазерної установки.

Електромеханічний координатний стіл призначений для високоточного переміщення оброблюваної деталі, щодо робочої поверхні фокусування лазерного пучка.

Що стосується системи контролю технологічного процесу лазерної обробки (елемент 9 на рис. 1.3), то наявність такої системи є відмінною рисою сучасних технологічних установок. Контроль процесу обробки в зоні фокусування лазерного пучка здійснюється візуально за допомогою відеокамери, що дає можливість спостерігати її і фіксувати весь технологічний процес в пам'яті комп'ютера для внесення необхідних коректив.

Основними параметрами лазерів, які визначають якість лазерної обробки, є такі: потужність випромінювання P , довжина хвилі λ , тривалість імпульсу τ , частота проходження імпульсів f , просторові характеристики модової структури випромінювання, розбіжність пучка α .

Потужність випромінювання лазера. Для лазера, що працює в безперервному режимі генерації, гранична щільність потужності випаровування оброблюваного матеріалу визначається як

$$q_H = kT_B / (Ar_0), \quad (2.1.)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

T_B – температура випаровування;

A – оптичний коефіцієнт поглинання ($A = 1 - R$ (R – коефіцієнт відбиття));

r_0 – радіус поперечного перерізу лазерного пучка у робочій фокальній площині.

Наприклад, для сталі $k = 0,32$ Вт / (см·К), $T_B = 3000$ К, а значення коефіцієнта поглинання при обробці випромінюванням Nd: YAG-лазера (часто використовуваного для обробки) з довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм становить $A = 0,5$. Підставляючи ці значення в формулу (1.12), для лазера з $r_0 = 10$ мкм отримуємо $q_H = 1,9 \cdot 10^5$ Вт / см².

Для імпульсного лазерного джерела з тими ж параметрами і аналогічним тепловим режимом обробки матеріалу гранична щільність потужності може бути обчислена за формулою

$$q_H = \frac{k T_B}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{a\tau}} \quad (2.2)$$

де a – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

τ – тривалість лазерного імпульсу.

При обробці сталі ($a = 3,45 \cdot 10^2$ см²/с) при $\tau = 10^{-4}$ с (характерна тривалість імпульсу твердотільних лазерів, що працюють в режимі вільної генерації) отримуємо $\approx 9 \cdot 10^5$ Вт/см². Знаючи граничну щільність потужності випаровування оброблюваного матеріалу, можна визначити необхідний пороговий рівень потужності лазерного випромінювання.

Для цього можна використовувати наступну формулу

$$P_{\text{пор}} = qS, \quad (2.3)$$

де S – площа лазерної плями у фокусі лінзи ($S = 4\pi r_0^2$).

З урахуванням виконаних раніше розрахунків для лазера безперервної дії отримуємо

$$P_{\text{пор.б}} = q S = 1,9 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \approx 239 \text{ Вт}$$

а для імпульсного лазера

$$P_{\text{пор.імп.}} = q S = 9 \cdot 10^5 \text{ Вт/см}^2 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \approx 1130 \text{ Вт}$$

Довжина хвилі і кутова розбіжність лазерного випромінювання.

Для ефективного впливу довжина хвилі лазера повинна знаходитися в спектральній області, де оброблюваний матеріал має найбільший та великий коефіцієнт поглинання.

Наприклад, для металів і ряду інших конструкційних матеріалів ефективним є використовувати лазери, що генерують випромінювання у видимій області спектра, для обробки скла – лазери інфрачервоного (ІЧ) діапазону, а для полімерів – ефективні ультрафіолетові лазери. Потрібно мати на увазі, що довжина хвилі визначає також розміри зони впливу лазера d (залежить від діаметру світлової плями в місці фокусування лазерного пучка на поверхні).

Ця величина може бути обчислена за наступною формулою

$$d = 1,22 \frac{\lambda f}{D} M^2 \quad (2.4)$$

де f – фокусна відстань;

D – діаметр вихідного лазерного пучка;

M^2 – коефіцієнт, що характеризує відмінність випромінювання технологічного лазера від ідеального гауссівського пучка. Цей коефіцієнт називається M^2 -параметр. Спрощено можна прийняти, $M^2 \approx D\alpha$,

де α – кутова розбіжність лазерного випромінювання. Для ідеального гауссівського пучка $M^2 = 1$, тому при створенні лазерів для поверхневої обробки потрібно прагнути до отримання генерації на нульовій поперечній моді TEM₀₀.

Таким чином, чим коротше довжина хвилі і менше кутова розбіжність випромінювання лазера, тим в меншу пляма можна його сфокусувати, а отже,

тим менше буде розмір зони впливу. На практиці можливе досягнення розміру зони впливу в одиниці мікрометрів для випромінювання видимого діапазону спектра і частки мікрометрів для ультрафіолетового випромінювання.

Загальна тривалість імпульсу. Чим менше тривалість імпульсу лазерного випромінювання, тим менший тепловий і деформаційний вплив воно має на оброблюваний матеріал поза зоною опромінення. Якщо імпульс випромінювання досить короткий, а щільність енергії досить висока, то малий обсяг металу може бути розплавлений і випарується до того, як тепло із зони опромінення встигне поширитися в навколишній матеріал.

Зона термічного впливу визначає глибину проплавлення шару, яку наближено можна оцінити за формулою

$$zt = \alpha \tau^{\frac{1}{2}} \quad (2.5)$$

де z – коефіцієнт температуропровідності, що залежить від теплофізичних властивостей матеріалу,

τ – тривалість лазерного імпульсу.

Ефективність процесу випаровування (абляції) матеріалу істотно залежить від щільності потужності (енергії) лазерного імпульсу і носить пороговий характер. Обсяг випаровуваного матеріалу логарифмічно залежить від щільності енергії, при цьому для імпульсів більшої тривалості ця залежність більш крута.

Таким чином, ефективний час впливу визначається наступним співвідношенням

$$\tau = d_0 / v_{\text{скан}}, \quad (2.5)$$

де d_0 – фокальний розмір лазерної плями 0

$v_{\text{скан}}$ - швидкість його сканування по оброблюваній поверхні.

Отже, при роботі з безперервними лазерами якість обробки буде тим краще, чим менше розмір сфокусованого лазерного пучка (більша щільність

випромінювання) і швидкість його сканування.

Частота проходження імпульсів.

Частота проходження (повторення) імпульсів лазерного випромінювання впливає на температуру оброблюваного матеріалу, яка змінюється після закінчення кожного імпульсу.

У цей момент часу середня температура поверхні може знижуватися, але якщо частота слідування перевищує мінімально допустиме значення $f_{кр} = a / (30r^2)$, то ці зміни спостерігатися не будуть і результат впливу лазерного випромінювання буде залежати тільки від енергії (потужності) окремих імпульсів. Наприклад, для сталі ($a = 3,45 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$) при $r = 10 \text{ мкм}$ розраховано

$$f_{кр} = 3,45 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с} : 30 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2 \approx 11,5 \text{ Гц} . \quad (2.6)$$

Частоту повторення імпульсів потрібно завжди вибирати більше $f_{кр}$. У загальному випадку частота повторення імпульсів впливає на продуктивність роботи лазера – чим вище частота, тим вище швидкість обробки матеріалу.

Висновки до розділу. Більшість сучасних технологічних лазерних установок є автоматизованими комплексами і працюють під управлінням вбудованого мікропроцесора або персонального комп'ютера.

Основними параметрами лазерів, які визначають якість лазерної обробки, є такі: потужність випромінювання P , довжина хвилі λ , тривалість імпульсу τ , частота проходження імпульсів f , просторові характеристики модової структури випромінювання, розбіжність пучка α .

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО МАРКУВАННЯ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ПРОДУКЦІЇ

3.1. Загальна характеристика процесів лазерного маркування

Маркування – це комплекс написів, умовних позначень і зображень, розміщених на зовнішній упаковці, транспортних бирках і самому товарі для цілей індивідуалізації, транспортування, завантаження та розвантаження товару.

Основні функції маркування: інформаційна, ідентифікаційна, мотиваційна та емоційна.

Інформаційна функція маркування є основною. Найбільша питома вага припадає на основну й споживчу інформацію, менша – на комерційну. При цьому основна інформація на маркуванні дублює той же вид інформації в товарно-супровідних документах. Розбіжність даних основоположної інформації може бути наслідком фальсифікації інформації.

Ідентифікаційна функція маркування надзвичайно важлива, тому що це забезпечує простежуваність товарних партій на всіх етапах руху товару.

Емоційна і мотиваційна функції маркування взаємозв'язані. Барвисто оформлені маркування, що пояснюють тексти, застосування загальноприйнятих символів викликають у споживачів позитивні емоції і служать важливою мотивацією для прийняття рішення про покупку продукту.

Упаковка, етикетка, тара будь-якого продукту, товару або виробу містить різноманітну інформацію, яка може бути як корисною для споживача, так і заплутати його і ввести в оману.

Найбільш корисна для споживача інформаційна частина повинна відповідати принципам трьох «д» (достовірність, доступність, достатність) і не повинна вводити в оману щодо характеристик продукту, зокрема, його

природи, ідентичності, властивостей, стану, складу, кількості, тимчасових характеристик придатності (зберігання) або умов експлуатації, походження, способу виробництва або отримання.

У сучасному виробництві застосовується кілька видів маркувань [21, 22]. Вибір відповідного визначається безліччю факторів, серед яких особливості продукту, його термін придатності, умови зберігання і багато іншого.

Маркування краплеструменеве. Для нанесення інформації про товар використовуються стійкі чорнила. Нанесення фарби проводиться способом безконтактного друку, найчастіше при пересуванні товару по стрічці конвеєра. Завдяки тому, що безпосереднього контакту штампа з поверхнею товару не відбувається, наносити маркування можна практично на будь-які поверхні, в тому числі і нерівні. Наносити можна як графічну, так і текстову інформацію, при цьому можна застосовувати будь-який колір друку. Недоліком методу є використання хімічних речовин, що можуть контактувати з поверхнею.

Маркування ударно-точкове. Таке маркування називається ще перфорацією, інформація про товар наноситься за допомогою штампа, що складається з голок. Символи в маркуванні такого типу утворюються з поглиблень, утворених голками штампу. Таке маркування виробів широко поширене у важкій промисловості, наприклад, в металургії.

Штампкування і нанесення клейма. Такі способи маркування використовують найчастіше в харчовій промисловості. Клеймо чорнилом зазвичай наносять на м'ясну продукцію, а також на шкаралупу пташиних яєць. Штампкування широко застосовується в консервній промисловості, штампи застосовують для продуктів, розфасованих в упаковку з полімерів, і тетрапакетів. За допомогою таких методів маркування наносять необхідну для споживача інформацію, що включає в себе відомості про терміни реалізації та дату випуску даного товару. На бляшані кришки консервних банок штамп може наноситися як фарбою, так і у вигляді рельєфного зображення.

Лазерне маркування являє собою нанесення текстових і графічних

зображень на поверхню виробу під впливом високо інтенсивного лазерного випромінювання. Маркування деталей, вузлів або кінцевого виробу дозволяє виробнику контролювати обсяг продукції, що випускається, її якість і просувати свою торгову марку.

Кінцевий користувач отримує на маркованому виробі інформацію про тип і параметри продукції і гарантію якості від виробника. З існуючих способів маркування найбільш сучасним і гнучким методом є лазерне маркування, бо воно дозволяє управляти лазерним випромінюванням, точно дозуючи енергію для маркування в просторі і в часі.

Лазерні системи дозволяють отримати довговічне, зносостійке, термостійке, стійке до хімічних і механічних впливів, захищене від підробок маркування.

Лазерне маркування відрізняється високим рівнем якості, точності, швидкості нанесення, не впливає на властивості продукції, що маркується. Останнім часом інтерес до лазерного маркування пов'язаний також з виготовленням різної сувенірної продукції [21, 22].

Існує чотири типи лазерного впливу на поверхню оброблюваного матеріалу: *гравірування поверхні видаленням матеріалу, створення колірного поверхневого контрасту, оплавлення поверхні, гра-вірування з оплавленням* (рис. 3.1).

При гравіруванні під дією сфокусованого випромінювання видаляється частина матеріалу – до 100 мкм при звичайному маркуванні, до 0,5 мм при художньому гравіруванні або 3,5 мм при глибокому гравіруванні.

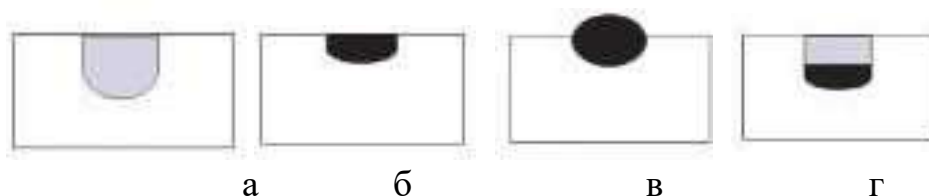


Рис. 3.1. Типи впливу лазерного випромінювання на поверхню оброблювано-го матеріалу: а – гравірування поверхні видаленням матеріалу, б – поверх-невий контраст, в – оплавлення поверхні, г – гравірування з

оплавленням

Технологія лазерного маркування отримала зараз доволі широке застосування у всіх галузях виробництва. Зокрема у мікроелектроніці воно застосовується для маркування заготовок, виробів і оснащення на всіх стадіях розробки і виробництва, наприклад, для кремнієвих пластин [11].

Гравірування наносять на будь які тверді матеріали, наприклад метал, кераміку, оргскло і акрил. Поверхню продуктів, бумагу. тощо

Широко використовується поверхневий кольоровий контраст в неметалевих матеріалах, який виникає при фотохімічному впливі на поверхню матеріалу, що маркується. Цей вид маркування застосовується в основному для неметалів, які знебарвлюються під дією лазерного ультрафіолетового випромінювання.

3.2 Застосування лазерного кольорового маркування

В основі лазерного кольорового маркування лежить процес утворення на поверхні зразка плівок з оксидів і нітридів оброблюваного матеріалу під впливом лазерного випромінювання. Кольори відтінків– веселкові кольори, які утворюються на гладенькій поверхні металу або мінералу в результаті утворення тонкої прозорої поверхневої окисної плівки і інтерференції світла в ній. Оксидні плівки формуються при лазерній обробці на відкритому повітрі.

Для отримання кольорових плівок наприклад, метали обробляють у спеціальній камері з піддувом в атмосферу азоту. Колір плівки залежить від її хімічного складу і товщини обробки .

У виробництві частіше створюються оксидні плівки, так як це не вимагає спеціального технологічного оснащення для азотування.

Оксидні плівки формуються в результаті однорідного нагрівання поверхні металу в звичайній атмосфері , що стимулює процес його окислення.

Наприклад, цей метод широко застосовується в металургії для художньої обробки металевих виробів.

Слід зазначити, що дана лазерна технологія отримання кольорових оксидних плівок має ряд значних переваг, в тому числі швидкість, локальність впливу і високу точність обробки тобто високу якість маркування. Це досягається завдяки малому (десятки мікрометрів) діаметру лазерного променя і застосуванню високоточних швидкісних систем сканування. При цьому, із збільшенням товщини оксидної плівки послідовно виникають умови кутового нахилу і гасіння променів з тією чи іншою довжиною хвилі, в результаті чого колір плівки може змінюватися від фіолетового до червоного під різними кутами. Однак на колір плівки впливає також і ступінь шорсткості поверхні. Для різних матеріалів утворення окисних плівок відбувається по різному.

На швидкість утворення окисних плівок значний вплив мають наступні характерні особливості :

- структура загартовані сталі окислюються повільніше;
- забрудненість поверхні масляні плівки обвуглюються до сажі, тому плівки виходять пухкими і нещільними;
- шорсткість поверхні на полірованій поверхні плівка вийде тонше, ніж на шорсткій при однакових умовах.

При маркуванні методом плавленням матеріалу досягається температура плавлення, проходять хімічні реакції окислення або зміни в поверхневій структурі і виникає видиме маркування.

Більш ефективним є гравірування поверхні з оплавленням матеріалу – комбінація видалення матеріалу з оплавленням, яке зосереджується в глибині гравірованого каналу.

В даний час в технологічних цілях (для маркування) можна використовувати всі типи лазерів: газові, твердотільні і волоконні.: Trottec 8003 Speedy C40 на базі CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм, середня потужність у безперервному режимі до 20 Вт), JQ-YAG-50 на основі Nd:YAG лазера ($\lambda = 1,06$ мкм, середня потужність до 50 Вт), МініМаркер2 на основі іте- рбієвого волоконного лазера ($\lambda = 1,03$ мкм, середня потужність до 20 Вт).

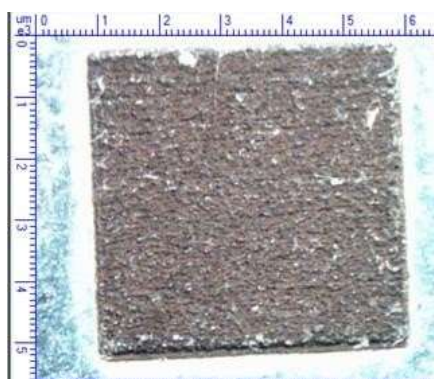
Лазерне кольорове маркування можна бути створене на будь-якому металі чи сплаві, за винятком золота та металів платинової групи. Оксидна плівка, утворена при лазерному нагріванні на поверхні активних металів, є нестійкою і з часом тьмяніє за рахунок подальшого атмосферного окислення.

Згідно із розрахунками, для досягнення поставленої мети потужність випромінювання повинна бути 16,5 – 20 Вт у безперервному режимі.

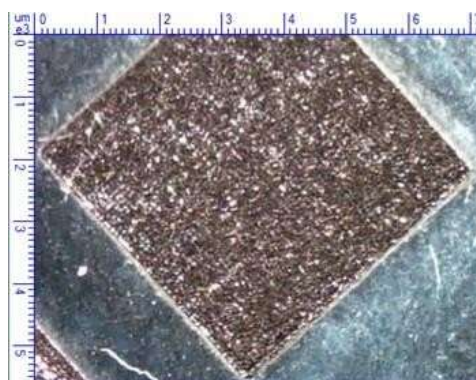
В результаті експериментів із застосуванням Nd:YAG-лазера було отримано поєднання гравірування з частковим кольоровим контрастом.

На рис. 3.3 наведений вигляд поверхні, обробленої при середній потужності 17 Вт і швидкості обробки 5 мм/с.

Частота проходження імпульсів змінювалась від 20 (зразок 1) до 2 (зразок 2) кГц. Дослідженнями в експерименті встановлено, що зменшення частоти імпульсів в одиницю часу обробки робить рельєф поверхні грубішим, а зображення стає більш темним. В цілому ці зміни незначні і не дозволяють сподіватися на створення кольорового зображення.



а



б

Рис. 3.5. Вигляд рельєфу поверхні деталі при різних режимах обробки:

а – частота проходження імпульсів 4 кГц, швидкість обробки 5 мм/с, б – частота проходження імпульсів 12 кГц, швидкість обробки 20 мм/с

Результати досліджень показують доцільність цього способу при гравіруванні монохромних зображень. Кольорове маркування вдалося отримати

тільки за допомогою волоконного лазера (рис. 3.6).

Подаючи 5, 10 і 20 імпульсів в точку, вдалося отримати жовтий, червоний і синьо-сірий кольори відповідно без зміни шорсткості поверхні.



а

б

в

Рис. 3.6. Залежність кольору маркування поверхні деталі від кількості імпульсів:

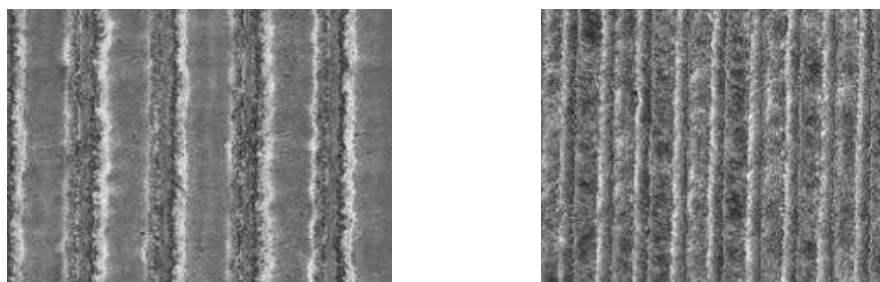
а – 5, б – 10, в – 15 імпульсів в точку обробки

Показано, що колір оксидної плівки залежить в основному від температури поверхні і наявного хімічного складу матеріалу деталі. А також встановлено, що волоконні лазери мають більш високу якість пучка M^2 , що і дозволило отримати в процесі багато імпульсної обробки різні кольорові гами відтінків обробленої поверхні..

Важливою характеристикою обробки лазерним променем є також інтервал сканування, який визначає відстань між лініями обробки, так звану роздільну здатність - чіткість зображення .

У цьому випадку рисунок кожної лінії створюється незалежно від інших і підсумкове зображення формується послідовно лінія за лінією. Для створення плівки однорідного кольору товщина лінії повинна варіюватися в межах від 20 до 50 мкм.

На цьому зображенні, отриманому за допомогою збільшуючого скануючого електронного мікроскопа, між лініями сканування видно поверхню вихідного матеріалу, однак неозброєним оком вона непомітна.



а

б

Рис. 3.7. Лазерне кольорове маркування з розділенням
а - 20, б - 30 ліній/мм

При лазерній обробці можливий такий режим сканування, при якому буде відбуватися перекриття ліній руху пучка лазера (рис. 3.7, б). В даному випадку розділення складає 30 ліній/мм. Оксидний поверхневий прошар формується за рахунок накопичення енергії сусідніх ліній. Оригінальної поверхні матеріалу між лініями в цьому випадку не залишається, тому колір обробленої поверхні має більшу однорідність і візуальну чіткість ніж при скануванні з роздільною

В результаті експериментів із застосуванням неодімового Nd:YAG-лазера було отримано гравірування з частковим кольоровим контрастом. Твердотільний неодімовий Nd:YAG-лазер показав що може використовуватися для гравірування на поверхні металу і одержання монохромних зображень на поверхні твердої продукції.

3.3 Лазерне маркування полімерних виробів

Застосування лазерів для маркування полімерів енергією випромінювання було вперше згадане ще в 1956. Лазери можуть створювати маркування на полімерах за допомогою одного з чотирьох різних процесів: зміни кольору, піноутворення при плавленні, монохроматичного гравірування або гравіювання зі зміною кольору.

Лазерне маркування можна наносити практично на всі класи комерційних пластичних полімерів. Залежно від того, які використовуються матеріали ,

позначки маркування можуть бути світлими на темному фоні або темними на світлому фоні. Однак більш сучасні типи маркувальних систем включають в себе темні або світлі відтінки на кольорових фонах за рахунок використання добавок до матеріалу що маркується. . Такими відмітками можуть бути білий, чорний або різні відтінки фонових кольорів. Крім цього, відмітки можуть мати різні кольори на білому, чорному або сірому фоні.

Для прикладу, на рис. 3.8 зображені приклади маркування на полімерних основах світле маркування на темному фоні (у центрі); зроблений на замовлення брелок для ключів золотого кольору з одноколірною подвійною рамкою (праворуч).

Енергія лазерного пучка, частота повторення імпульсів і пікова щільність потужності є критично важливими параметрами при створенні маркування та отриманні оптимального контрасту і швидкості.

Вид поверхні полімеру після такого маркування представлений на рис. 3.9



Рис. 3.8. Приклади маркування пластмасових виробів

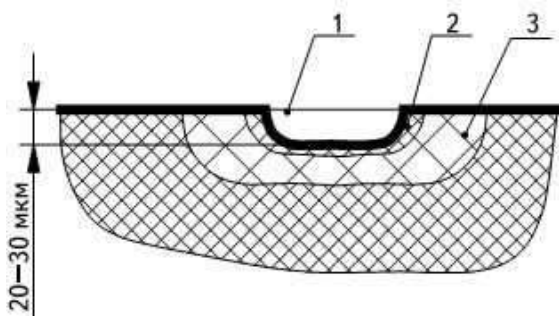


Рис 3.9. Зображення поверхневого шару деталі після маркування, заснованому на термічному ефекті:

- 1 – канавка, одержувана в результаті нагріву, плавлення і випаровування матеріалу,
- 2 – зона обвуглення матеріалу,
- 3 – зона матеріалу з частково зміненою структурою

Для маркування органічних матеріалів, зокрема продуктів сільськогосподарського виробництва, досить ефективно застосовуються CO₂-лазери типу ТЕА. Ці лазери генерують випромінювання, що однаково добре поглинається практично всіма видами полімерів. Маркування проводиться проєкційним методом або методом сканування поверхні. CO₂-лазери можуть працювати на високих швидкостях, створюючи до 6000 відміток у хвилину. Найбільш ефективні ці лазери в тих випадках, коли потрібна висока продуктивність, а висока точність зображень не є визначальною вимогою.

3.4 Обґрунтування і розробка маркування продуктів харчування

Останнім часом в світі спостерігається тенденція поступового повернення від пластикової тари до натуральної, виробленої з природних матеріалів. Також новою тенденцією є лазерне маркування продуктів, таких, як овочі, фрукти і сир. Як правило, використовується друкована етикетка, але вона має високу вартість, незручна у використанні і може завдавати шкоди навколишньому середовищу при її утилізації. Перевагами безпосереднього маркування на продукції в порівнянні з традиційними способами є практична гігієнічність, не токсичність, швидкість нанесення необхідного маркування і відсутність великих затрат на процес маркування.

Зображення на поверхні продуктів харчування може формуватися або створенням малюнку поверхневого контрасту, або шляхом випаровування ділянок поверхні, тобто об'ємним гравіруванням. В даний час набули широкого вжитку і застосовуються обидва ці способи [27].

Вперше пряме лазерне маркування продуктів харчування використовувалося для створення комерційної фірмової інформації на фруктах з товстою шкіркою – апельсинах, мандаринах лимонах, бананах. Ця технологія передбачала нанесення на поверхню плодів хімічних реактивів, що змінюють колір під дією лазерного випромінювання. Лазерний промінь при цьому не

проникає в поверхню шару шкірки, він тільки позбавляє пігментації його верхній прошарок. Для підвищення контрастності застосовували спеціальну пігментовмістну рідину. Рідина розпорошується на фрукт відразу після маркування лазером (рис. 3.11).

Міжнародне визнання отримала технологія лазерного маркування іспанської компанії Laser Food, яка розробила в 2009 році лазерну систему, яка може маркувати до 54 000 фруктів на годину. До 2012 року велися переговори з ЄС, щоб отримати схвалення її використання. Що цікаво, в Європейській спільноті не могли вирішити наскільки шкідливі допоміжні хімічні речовини, що застосовуються у маркуванні. Але в 2013 році ЄС схвалив використання оксидів і гідроксидів заліза та інших хімічних речовин для маркування на фруктах, з цього моменту лазерне маркування використовується повсюди.



Рис. 3.11. Лазерне маркування апельсинів

Картина лазерного маркування може містити масу інформації: логотип і місце походження фруктів, штрих-коди, які можуть бути відскановані для доступу до більш повної інформації про продукцію та QR-коди, які можуть бути відскановані зі смартфонів [28]. Згідно з рішенням ЄС, така технологія буде використовуватися на фруктах, у яких зазвичай очищають і викидають зовнішню захисну оболонку -шкірку.

Хімічні речовини використовуються в невеликих кількостях і тільки на зовнішній частині фруктів без значного потрапляння в середину. Вони використовуються тільки для покриття продуктів, щоб надати їм апетитний колір, але безпечні, тому що не всмоктуються організмом. Відповідно визнано доцільним використовувати технологію для маркування цитрусових, динь і гранатів, ківі тощо.

Система лазерного маркування залишає на шкурці фрукта або овочу інформацію, яку неможливо видалити або корегувати. така технологія більш економічна за інші види маркування, так як виключає використання витратних матеріалів, таких як фарба, клей, папір, тощо.

Широко впроваджується система маркування наноситься за допомогою газового CO₂-лазера, при цьому, для підвищення контрасту використовуються пігменти на основі оксидів і гідроксидів заліза. Пігмент проникає тільки у верхні клітинні шари шкірки, поверхня продукту практично не руйнується. Отримується по суті, так зване татуювання (рис. 3.12), яке не веде до втрати вологи і не викликає проникнення патогенних організмів.



Рис. 3.12. Приклад лазерне маркування (татуювання) цитрусових фруктів

Вчені з Університету Флориди (США) довели, що обробка поверхні плода лазером не призводить до втрати ним вологи і проникнення хвороботворних

інфекцій протягом періоду зберігання.

У Китаї розроблено спосіб маркування фруктів видимими жовтим та зеленим потужним випромінюванням, які мають щільну пігментовану шкірку, наприклад, яблук (рис. 3.13). Зображення створюється випромінюванням видимого діапазону, довжина хвилі підбирається в залежності від кольору шкірки. Відмінною особливістю даного методу є відсутність будь-яких додаткових хімічних реагентів. Потужне випромінювання змінює колір пігменту в шкірці, не порушуючи її цілісності.

Ще поширеним методом маркування продуктів є гравірування на поверхні. Як правило, це зображення має деяку глибину (рельєф), і в цьому полягає основна відмінність лазерного гравірування від лазерного кольорового маркування.



Рис. 3.13. Лазерне гравірування яблук

Монохроматичний лазерний промінь проникає в глибину поверхні шкірки яблука, груші, кавуна, на два-три клітинних прошарки. Шкірка помідора, наприклад, має близько ста шарів, тому такий метод маркування теж можна використовувати для фруктів і овочів (рис. 3.14) [29].

Така система маркування функціонує в Новій Зеландії та Австралії, і компанія-виробник комерційно впроваджує її по всьому світу. Легкість та доступність даної технології та особливість Що пряме лазерне маркування може також наноситися не тільки на фрукти та овочі, а й на продукти тваринного походження, в першу чергу, на сир і яєчну шкаралупу.

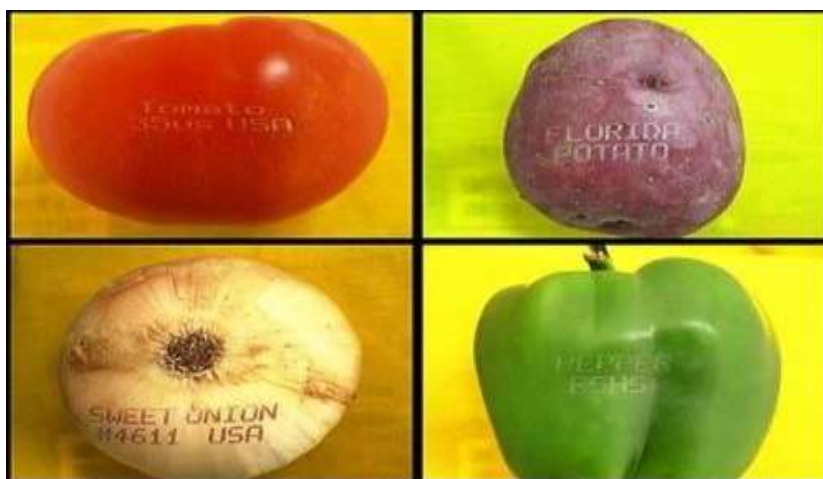


Рис. 3.14. Лазерне гравірування овочів

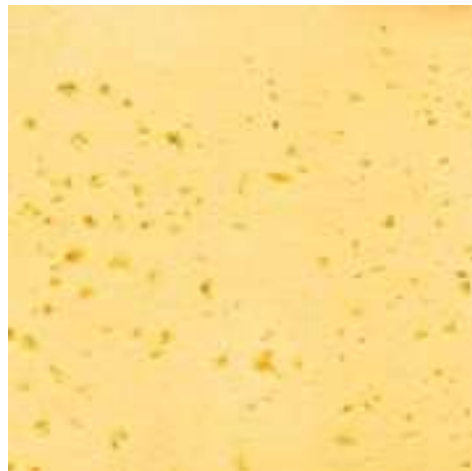
Для того, щоб визначити який лазер підходить для маркування сиру, проводився ряд експериментів з підбору довжини хвилі випромінювання.

Дослідження можливості отримання видимого зображення на поверхні сиру проводились за допомогою трьох типів лазерів. Для проведення експерименту використовувалися: газовий CO_2 - лазер з довжиною хвилі 10,6 мкм, волоконний лазер з довжиною хвилі 1,064 мкм і твердотільний лазер з довжиною хвилі випромінювання 1,064 мкм. Обробка проводилася на режимах, рекомендованих для маркування неметалів та полімерних покриттів. Маркуванню піддавали поверхні головок сиру та сирні продукти українського виробництва Найкращий результат був отриманий на установці з газовим CO_2 -лазером з режимом: потужність імпульсу $P = 80$ Вт, частота імпульсів $\nu = 500$ Гц, швидкість сканування поверхні $V = 0,2$ м/с. Випромінювання цього лазера, яке знаходиться в інфрачервоній частині спектра, є по суті сконцентрованою тепловою енергією. Результати представлені на рис. 3.15. При стандартному

режимі лінії рисунку вийшли не однорідні, присутній обвуглений шар (рис. 3.15, а).



а



б

Рис. 3.15. Маркування на сири: а – CO₂-лазер, б – твердотільний лазер.

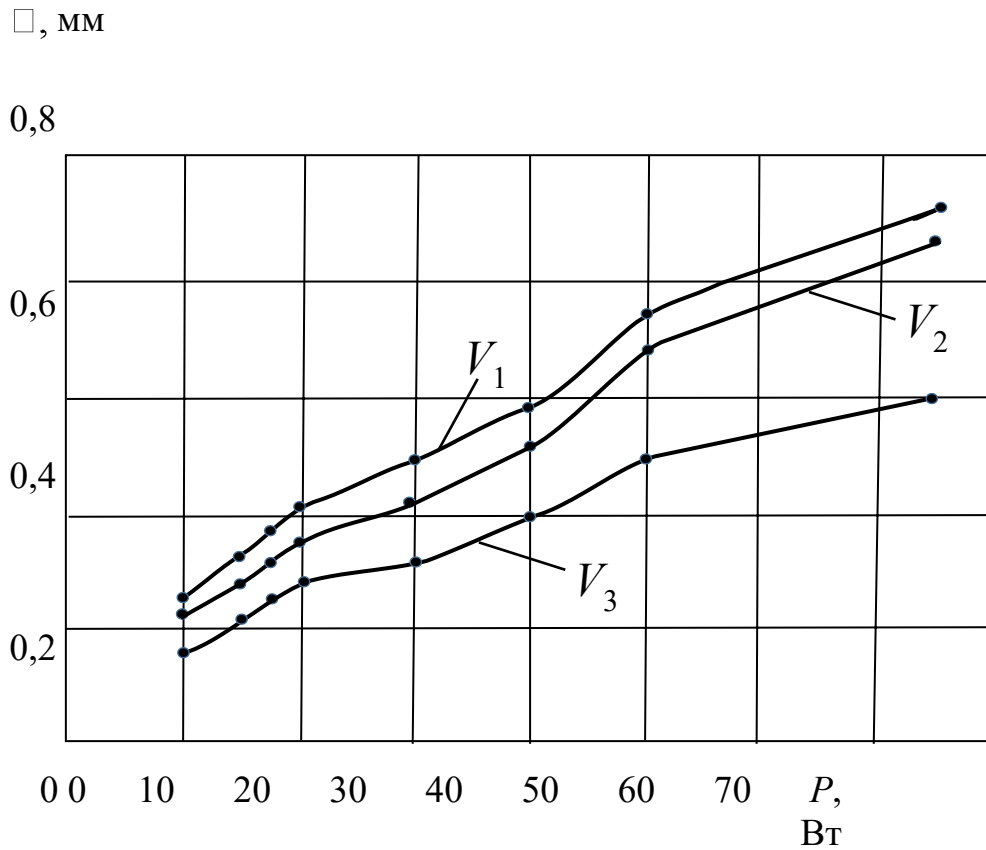
Експерименти, проведені на волоконному і твердотільному лазерах дали непомітного результату (рис. 3.15, б). При обробці вкілька проходів (від 2 до 6) на зразку спостерігався слабкий слід, що складається з випарованих крапель води. Це пояснюється тим, що лазерне випромінювання, потрапляючи в середину сиру, поглиналося вологою, яка міститься в сири.

Подальша практична робота по визначенню ефективних режимів лазерного маркування твердого сиру проводилася на установці з CO₂-лазером.

Основним параметром, що впливає на процеси гравірування, є потужність. Метою експерименту був вибір потужності, що дозволяє отримати максимально контрастне і чітке маркування без обвугленого шару.

Значення потужності варіювалося від 10 до 50 Вт при постійних швидкостях сканування променем поверхні продукту на швидкостях $V_1 = 0,02$ м/с, $V_2 = 0,04$ м/с, $V_3 = 0,06$ м/с. Частота проходження імпульсів лишалася незмінною $\nu = 1000$ Гц. Результати експерименту показані на рис. 3.16. Зміна швидкостей сканування на $V_2 = 0,04$ м/с і $V_3 = 0,06$ м/с принципово не вплинула на характер залежності, але глибина ліній і їх контрастність при збільшенні швидкості сканування ставала менше. При більшій швидкості маркування ставало менш помітним на меншу

глибину проходила обробка поверхні оболонки сиру.



а

Рис. 3.16. Залежність глибини ліній маркування від потужності ви промінювання: а – сир, б – сирний продукт



а



б

Рис. 3.17. Зовнішній вигляд штрихкоду маркування при швидкості $V_2 = 0,04$ м/с:
а – сир, б – сирний продукт.

В якості постійних величин були обрані такі значення потужності $P_1 = 75$

Вт, $P_2 = 50$ Вт, $P_3 = 20$ Вт. Частота проходження імпульсів лишалася незмінною $\nu = 1000$ Гц. Швидкість переміщення змінювалася від 0,02 до 0,2 м/с. За результатами експерименту був побудований графік (рис. 3.18).

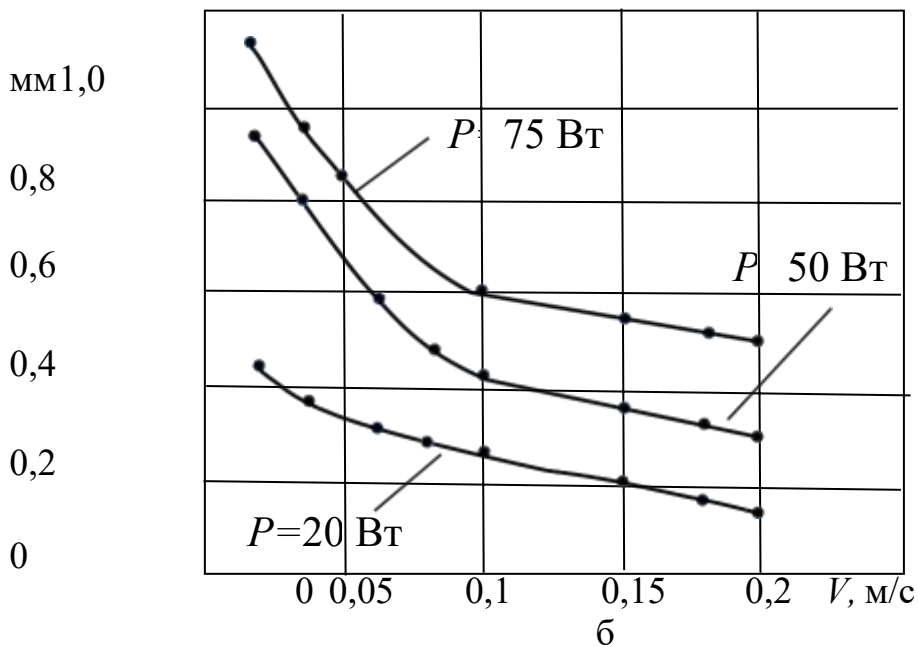
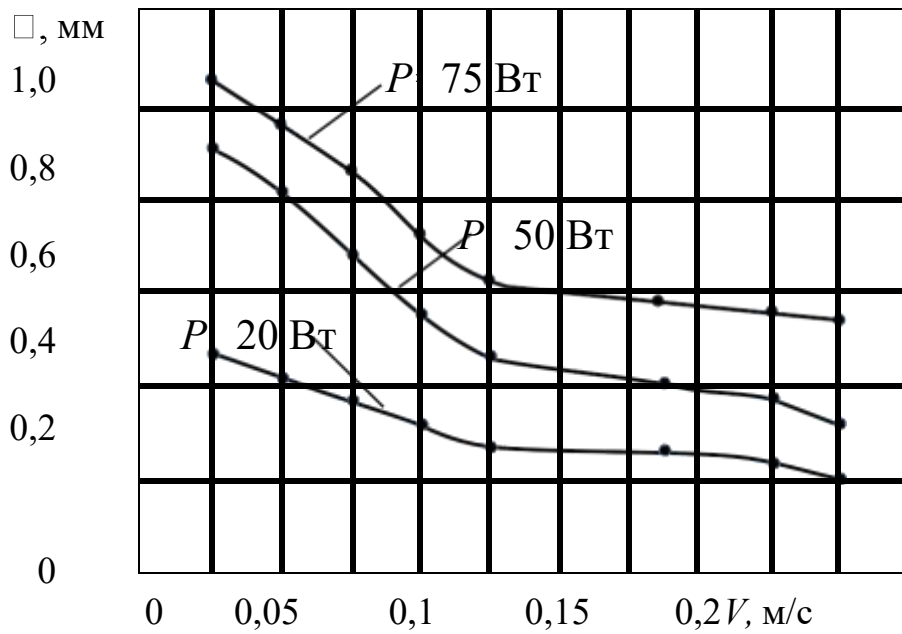


Рис. 3.18 – Залежність глибини ліній маркування від швидкості переміщення лазерного променя: а – сир, б – сирний продукт

Цікавим результатом дослідження стало зменшення глибини лазерного маркування при зниженні потужності променю випромінювання, при цьому фото зовнішній вигляд поверхні, представлений на рис 3.19.

Також практично у всьому дослідженому діапазоні швидкостей на даній потужності випромінювання спостерігалось обуглення поверхні обробітку. В подальшому зниження потужності до 50 Вт, як і прогнозувалось, привело до зменшення глибини проплавлення, обуглення практично не спостерігалось.

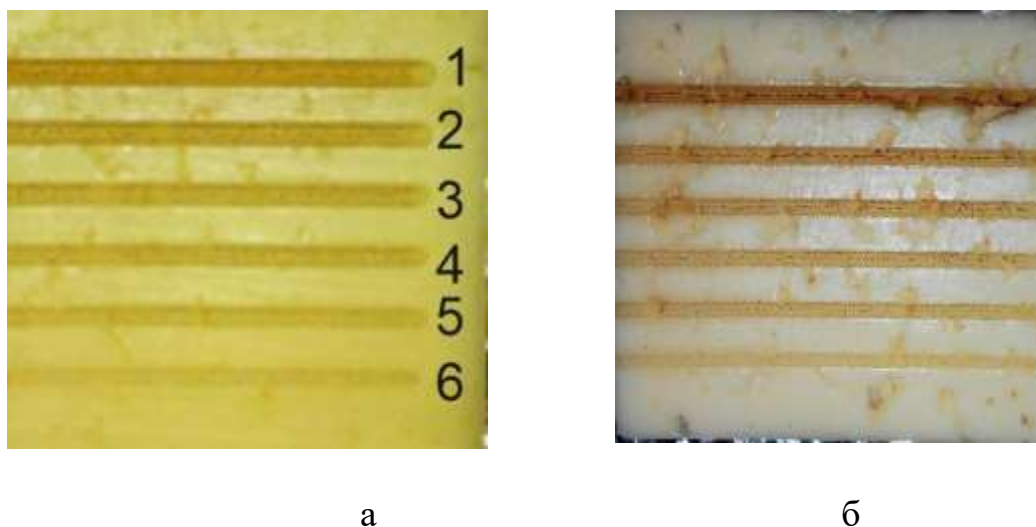


Рис. 3.19. Зовнішній вигляд ліній лазерного маркування при потужності променю 50 Вт: а – сир, б – сирний продукт.

Маркерні лінії, 2, 3, 4, 5, 6 отримані при різних швидкостях сканування:

$$V_1 = 0,02 \text{ м/с}, V_2 = 0,04 \text{ м/с}, V_3 = 0,06 \text{ м/с}, V_4 = 0,08 \text{ м/с}, V_5 = 0,1 \text{ м/с}, V_6 = 0,2 \text{ м/с}$$

Встановлено, що найбільш суттєво на якість маркерного зображення впливає частота проходження імпульсів.

Для іншого дослідження - впливу частоти проходження імпульсів на картинку маркування була обрана максимальна непошкоджуюча потужність 50 Вт, при якій не виникає обуглення.

Швидкість переміщення лазерного променю прийнята в 0,04 м/с. В процесі експерименту частота проходження імпульсів змінювалася від 100 до 10000 Гц. Результати експерименту представлені у вигляді графіка на рис. 3.20.

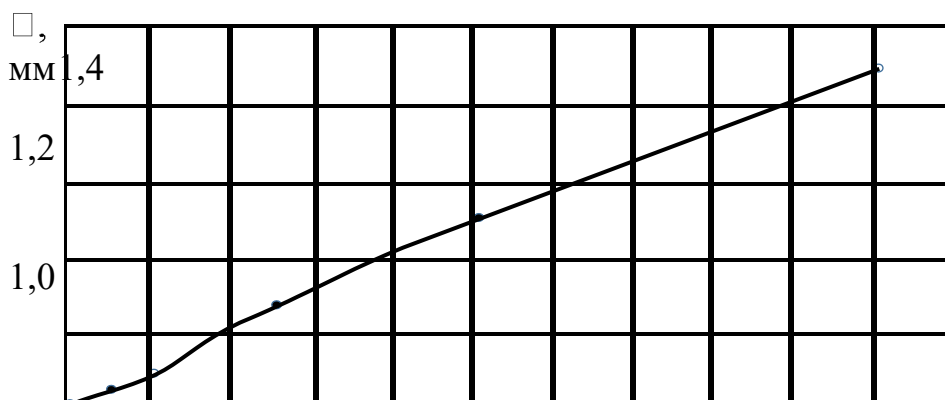


Рис. 3.20. Залежність глибини ліній маркування від частоти проходження імпульсів: а – сир, б – сирний продукт

Із наведених графіків видно, що із збільшенням частоти проходження імпульсів глибина ліній збільшується у відповідності до збільшення загальної енергії опромінення. Можна констатувати, що при частоті проходження імпульсів 100 Гц кінці ліній були чіткими, але поверхня сиру та сирного продукту була обвуглена. Збільшення частоти проходження імпульсів вплинуло на глибину ліній та їх контраст, а також на якість зображення. Найбільш якісне зображення без обвуглення поверхні відповідає значенням частоти від 150 до 500 Гц.

Зовнішній вигляд картини маркування представлений на рис 3.21. Встановлено дослідженнями, що для забезпечення максимального візуального контрасту лазерне маркування повинно бути максимально глибоким, але без обвуглених країв. Виходячи з виконаних експериментів, можна вибрати оптимальний режим для лазерного маркування сиру та сирного продукту значенням частоти від 150 до 500 Гц.

Лазерне маркування яєць. Шкаралупа пташиних яєць складається на 90 % з карбонату кальцію, а також містить мікроелементи, в тому числі мідь, фтор, залізо, марганець, молібден, фосфор, сірку, кремній, селен, цинк та інше. Різні елементи по різному взаємодіють з лазерним променем.

Дослід досліджень лазерного маркування деяких європейських фірм свідчить, що операція маркування повинна виконуватися протягом малого інтервалу часу і бажано на невеликій площині.



а



б

Рис. 3.21 – Зовнішній вигляд маркування при різних частотах проходження імпульсу: а – сир, б – сирний продукт

Зважаючи на те, що маркування наноситься на шкірку товару (рис. 3.22), можна рекомендувати ці режими для впровадження у промисловість.



Рис. 3.22. Приклад лазерного маркування сиру

У зв'язку із зазначеними часовими і просторовими обмеженнями, кількість і складність написів і позначень, що наносяться на яйця, також повинна обмежена, тобто лазерний маркувальний пристрій повинен забезпечувати нанесення інформації достатню, щоб його можна було вбудувати в сортувальну машину, не створюючи завад у технології і тривалості роботі [33-35].

Для проведення досліджень з маркування яєць був обраний доступний дешевий і технологічний CO₂-лазер потужністю до 120 Вт. Довжина хвилі лазера ідеально підходить для того, щоб більша частина поверхні яєчної шкаралупи залишалася незайманою для забезпечення контрасту між маркуванням.

Дослідження процесів маркування проводились на курячих яйцях із відповідною шкаралупою двох видів: білих і темно-коричневих. Змінними параметрами в дослідженнях було обрано частоту проходження імпульсів, потужність лазерного випромінювання, швидкість переміщення лазерного променя (мм/с). Результати дослідження приведено нижче.

На рис. 3.23 наведено лазерне маркування, виконане при потужності випромінювання 110 Вт та швидкості сканування 20000 мм/с.



Рис. 3.23. Приклад лазерного маркування курячого яйця

Отримане зображення чітке, рельєфне, інформативне. Промінь лазера плавить і висвітлює матеріал зовнішньої поверхні шкаралупи яйця. При цьому не порушується цілісність і герметичність структури яєчної шкаралупи, оскільки гравірування лазерним променем здійснюється на глибину від 50 до 90 мкм, що становить приблизно 8 % товщини шкаралупи. При цьому дослідження показали, що на великій потужності променя білок, плівки підшкарлупи, який прилягає до зворотного боку маркованої шкаралупи, прогрівається приблизно до 50 °C і дещо заварюється. При зниженні

потужності нижче 90 Вт такого нагрівання практично не виникає.

Узагальнюючи викладене можна стверджувати, що для маркування яєць більше значення має тривалість часу обробки, ніж потужність випромінювання.

Час обробки визначається швидкістю сканування. Результати досліджень наведені на рис. 3.24.

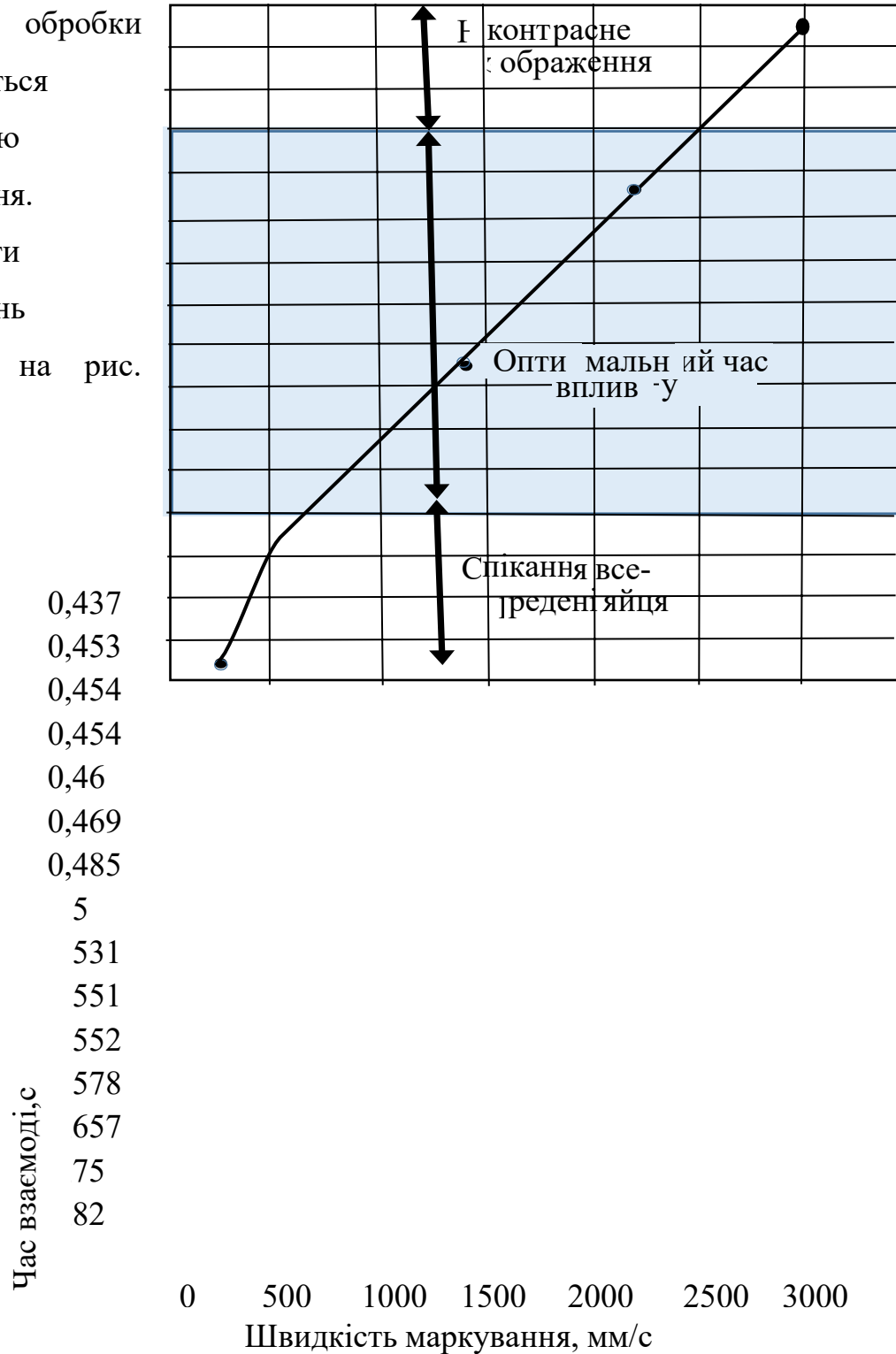


Рис. 3.24. Залежність швидкості лазерного маркування від часу впливу променя на шкаралупу курячого яйця

В результаті досліджень рекомендується маркувати яйця за час обробки, що дорівноє близько 450 мс.. Такий режим обробки лазерним променем дозволяє забезпечити достатню глибину фокусування, а це означає, що яйця не обов'язково повинні бути однакового розміру. В межах фізичної похибки. Інакше кажучи, технологічна зміна відстані до поверхні шкаралупи яйця на 10 мм, пов'язана з різними розмірами яєць, не матиме значення, оскільки точка фокусу променю в таких межах може змінюватися.

Великою перевагою використання лазерного маркування є те, що на яйцях з темною шкаралупою гравіруванням створюються знаки і написи більш контрастного білого кольору, в той час як на яйцях з білою шкаралупою менш якісне зображення темно-коричневого кольору (рис.3.25).



Рис. 3.25 – Приклад маркування курячих яєць із шкаралупою різного кольору

Висновки до розділу. Результати проведених дослідження показують, що для маркування яєць більше практичне значення має час обробки, над потужністю лазерного випромінювання.

Встановлено, що час обробки визначається швидкістю лазерного сканування. Рекомендується маркувати яйця протягом 450 мс. При цьому фокусна відстань променя повинна становити близько 100 мм, що дозволяє отримати ширину променю або розмір плями приблизно 0,3 мм в межах коливання стандартних змін розміру яєць .

Достатньо значна техніко-економічна ефективність застосування лазерів

при маркуванні і сортуванні курячих яєць обумовлена не тільки їх перевагами як висококонцентрованих джерел енергії, а й їх гнучкістю і універсальністю як технологічних інструментів, що можуть бути впроваджені у будь-який сортувально-маркувальний комплекс без внесення значних змін в технологічний процес.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ

4.1 Аналіз методів очищення поверхні

Технічне рішення проблеми підвищення якості машин і приладів та строку служби їх роботи в значній мірі обумовлено можливістю технологічного забезпечення якості поверхневого шару замінних деталей, що визначається сукупністю характеристик – шорсткістю поверхні, фізико-механічним станом, мікроструктурою металу поверхневого шару і рівнем залишкових напружень [27].

Очищення поверхні будь якої деталі для отримання необхідної якості її поверхнів є однією з базових технологій в багатьох галузях промисловості. Для деяких видів виробництв – зварювального, лакофарбового, гальванічного – очищення поверхні є актуальним питанням, тому що висока якість очищення поверхні гарантує високий ресурс і надійність роботи різних виробів.

В даний час використовується досить багато різних методів очищення поверхні: механічних, ультразвукових, хімічних, електрохімічних та інших, які успішно використовуються в промисловості [38].

Як відомо, пучок лазера є універсальним технологічним інструментом, що має унікально високі питомі енергетичні характеристики для обробки матеріалів. Випромінювання лазера, забезпечуючи щільності потужності в зоні впливу на поверхню металу більш ніж 10^8 Вт/см², відкриває можливість випаровування будь-яких металів при тривалості впливу наносекунди і менше [39].

Висока швидкість і відповідно продуктивність лазерного очищення поверхні, що досягає декількох квадратних метрів на годину, висока екологічна безпека, відсутність витратних матеріалів, висока технологічна відтворюваність процесу, відкриває широкі можливості впровадження даної технології в різних

галузях промисловості.

Традиційно дефекти поверхневого шару металу, органічні і неорганічні забруднення видаляються механічною, ультразвуковою, хімічною та електрохімічною обробкою та іншими методами.. Ультразвукове очищення – широко впроваджений спосіб обробки поверхні твердих тіл, при якому в миючий розчин спричиняють ультразвукові (УЗ) коливання. Введення ультразвукової енергії хвиль дозволяє не тільки прискорити процес очищення, а й отримати високу ступінь чистоти поверхні, а також замінити ручну працю. Ультразвукове очищення застосовується в машинобудівній, металургійній, електронній промисловості, в напівпровідниковій техніці і в приладобудуванні для очищення прецизійних деталей точних приладів, годинників і ювелірних виробів, інтегральних мікро-схем, хірургічних інструментів, металокерамічних фільтрів, металургійного прокату та ін.

4.2. Фізичні основи лазерного очищення поверхні

Більшість технологічних операцій, що знайшли своє місце в процесах очисної обробки здійснюються за допомогою лазерів і засновані на тепловій дії світла на оброблюваний матеріал. При цьому технологічний процес взаємодії лазерного випромінювання з речовиною умовно можна розділити на такі стадії: поглинання світла; передача енергії тепловим коливанням решітки твердого тіла; нагрівання матеріалу; плавлення – руйнування матеріалу шляхом випаровування і викиду розплаву та охолодження після закінчення світлового впливу [40].

Названі фізичні процеси, що відбуваються при лазерному очищенні поверхні, відрізняються великою різноманітністю і їх параметри та результативність залежать в першу чергу від щільності потужності (q_0) падаючого лазерного випромінювання на поверхні.

Дослідженнями встановлено, що при потужності $q_0 \approx 10^4 - 10^5 \text{ Вт/см}^2$ відбувається нагрів матеріалу без зміни агрегатного стану речовини. Цей діапазон щільності потужності застосовується, зокрема, для термічної обробки (підвищення твердості поверхневих шарів та їх зносостійкості для відпалу напівпровідникових матеріалів, що поліпшує характеристики мікросхем, які з них виготовляються), а також для поділу крихких матеріалів за рахунок створення механічних напружень.

Підвищення щільності лазерного опромінення поверхні q_0 до $10^5 - 10^6 \text{ Вт/см}^2$ призводить до плавлення. Це область деяких операцій так званого «лазерного легування», а також точкового і шовного зварювання, що має переваги перед зварюванням традиційними контактними способами

зварювання матеріалів, що легко деформуються,

у важкодоступних місцях

і при мінімумі теплового впливу на сусідні ділянки.

При лазерному легуванні реалізується можливість отримати високу чистоту модифікованих поверхневих шарів матеріалів, особливо в операціях напівпровідникової техніки.

Якщо величина щільності променя $q_0 \sim 10^6 - 10^7 \text{ Вт/см}^2$ то ця потужність обробки дозволяє проводити нагрів поверхні з видаленням речовини із зони теплового впливу. Завдяки цьому можна виготовляти отвори (свердлити), фрезерувати, різати практично всі матеріали, випаровувати та проводити відбір мікропроб для аналізу речовини.

При надвисоких потужностях $q_0 > 10^7 - 10^8 \text{ Вт/см}^2$ утворюється лазерна поверхнева плазма, що поглинає випромінювання і тим самим ускладнює проведення технологічних операцій.

Загальна схема процесів впливу лазерного випромінювання на матеріали стосовно очищення поверхні наведена на рис. 4.1.

Показано, що процеси лазерного нагрівання, випаровування а також швидке теплове розширення і виникнення ударних хвиль лежать в основі

механізмів лазерного очищення, в той час як світіння плазми і акустичний сигнал в повітрі можуть бути використані для контролю режимів обробки і ступеня очищення поверхні.

Узагальнюючи викладене можна констатувати, що для очищення поверхні різних матеріалів має практичне застосування весь спектр процесів взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, причому не тільки на повітрі, але і в рідкому середовищі, де часто процеси видалення забруднень йдуть набагато ефективніше і з меншими енергетичними витратами енергії.

Основними механізмами лазерного очищення поверхні є випаровування і ударно-механічний вплив. Розглянемо їх більш докладно.

Випарні механізми лазерного очищення. Традиційно склалось, що спочатку були створені і використовувалися переважно випарні механізми лазерного очищення поверхні [39], коли щільність потужності випромінювання перевищує значення, при якому починається випаровування забруднюючих речовин з поверхні.

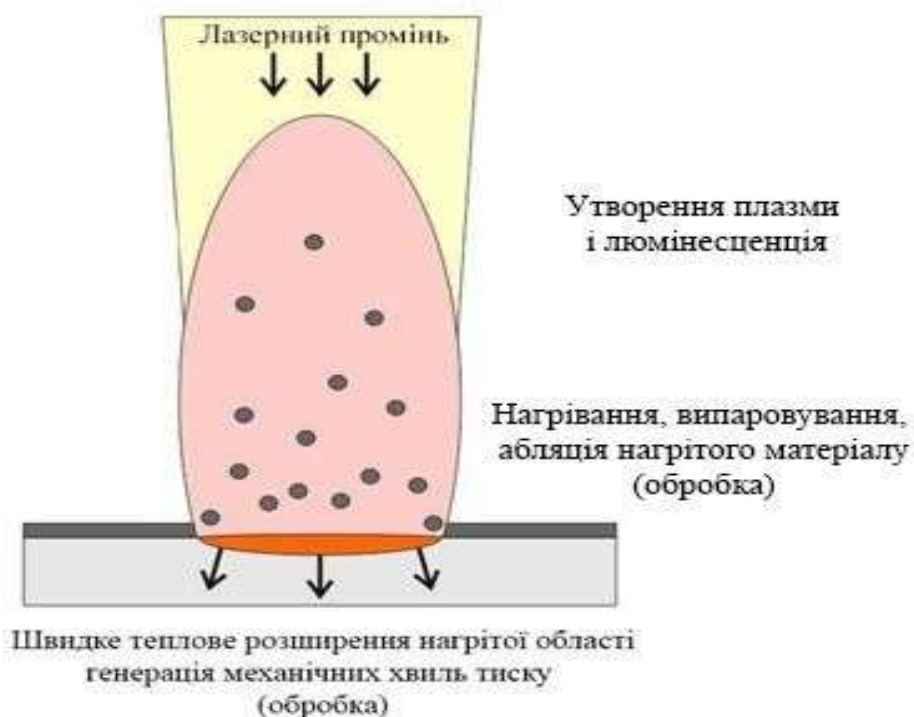


Рис. 4.1. Загальна схема процесів впливу потужного лазерного випромінювання на матеріали при лазерному очищенні поверхні

В цьому випадку в основі фізики процесу лазерного видалення поверхневих шарів лежить ефект випаровування, - переведення матеріалу з твердої фази в паро-газо-плазмову (рис. 4.2).



Рис. 4.2. Приповерхнева лазерна плазма

При очищенні випаровуванням, як правило, випромінювання потужного імпульсного лазера фокусують на поверхні деталі, щоб щільність потужності випромінювання за період імпульсу приводила до інтенсивного підвищення температури поверхневого шару аж до температури його швидкого руйнування (ви-паровування). Орієнтовна величина такої щільності потужності становить $10^7 - 10^{10}$ Вт/см². Для отримання такої щільності енергії при фокусуванні в пляму розміром близько 0,5 мм достатньо лазера з середньою потужністю всього 10 Вт [39].

Слід зазначити, що значну роль для даного очищення мають фізичні властивості оброблюваного матеріалу. Найбільш важливі з них це: теплопровідність, коефіцієнт відбиття лазерного випромінювання.

Максимальна глибина шару, який випаровується, визначається наступним чином

$$D \propto \frac{E}{\rho} \quad \square \quad \square \quad \square$$

(4.1)

$$A \rho C (T_1 - T_0) L$$

де E_0 – енергія, отримана під дією лазерного імпульсу;

A – опромінювана площа;

ρ – густина матеріалу;

C – питома теплоємність;

T_1 – температура кипіння матеріалу;

T_0 – температура навколишнього середовища;

L – прихована теплота пароутворення.

Даний вираз дає лише наближене визначення, тому що практично теплофізичні параметри матеріалів змінюються в залежності від температури процесу обробки та довжини хвилі (енергії фотонів) випромінювання. Очищення випаровуванням застосовується, як правило, для видалення забруднень з низькою температурою випаровування.

Зі співвідношення (4.1) слідує, що метали поглинають випромінювання лазера в лишу в тонкому поверхневому шарі, тоді як неметалеві речовини мають об'ємне поглинання. Таким чином, при практичному очищення металевих деталей, при товщині неметалевого забруднення в кілька сотень мікрон припустимо вважати, що цей шар відносно оброблюваний

Відомо, що поширення світла в середину речовини, описується законом Бугера-Ламберта-Бера

$$q(x) = q_0(1 - R) \exp(-\alpha x), \tag{4.2}$$

)

де $q(x)$ – щільність потужності випромінювання на глибині x ;

q_0 – щільність потужності випромінювання, що падає на поверхню матеріалу;

R – коефіцієнт відбиття речовини;

α – показник поглинання речовини.

Опишемо процесуально і детально механізм лазерного очищення

поверхні металів від неметалевих забруднень випаровування бруду (рис. 4.3).

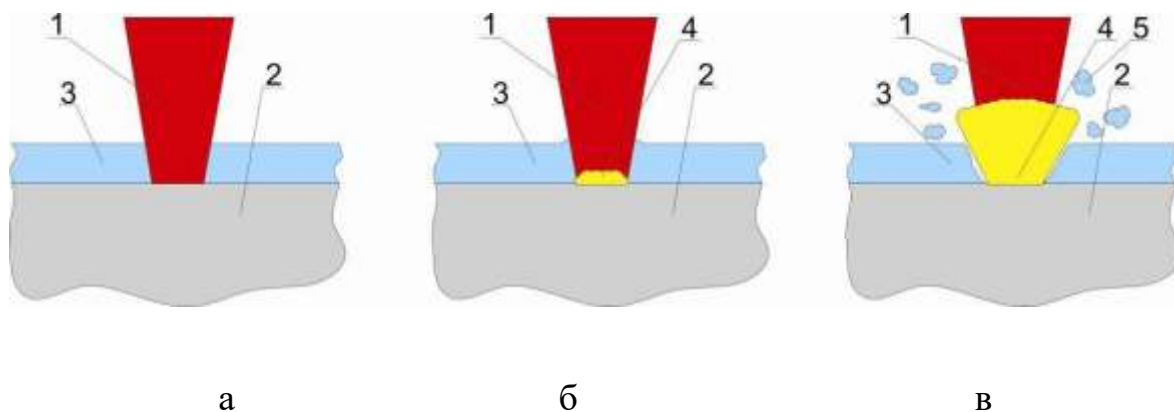


Рис. 4.3. Випарний механізм лазерного очищення □ 1 – лазерний пучок; 2 – забруднений матеріал; 3 – забруднення; 4 – хмара випарованої речовини; 5 – частинки забруднення, які видалені з поверхні матеріалу

Лазерний імпульс, потрапляючи на забруднену поверхню, проходить крізь забруднення практично без ослаблення і поглинається в поверхневому шарі матеріалу деталі (рис. 4.3, а). У випадку, коли щільність потужності лазерного випромінювання достатня для того, щоб розігріти матеріал (метал) до температури кипіння на границі розділу забруднення – основний матеріал, починається його випаровування (рис. 4.3, б). Під тиском розігрітої до високих температур пари прошарок неметалевого забруднення руйнується і відділяється від поверхні деталі що очищується (рис. 4.3, в). Таким чином, вибір оптимального режиму роботи лазера у випарному режимі очищення зводиться до забезпечення мінімальної температури випаровування речовини основного металу.

На практиці цей режим досягається в імпульсному режимі, забезпечується мінімальне випаровування речовини основного металу [41]. Крім того, чим менше тривалість впливу, тим менше розмір прогрітої зони речовини і, отже, менше кількість розплаву і пари, що утворюється (тобто менше пошкодження основної речовини) при більшому тиску останнього. Для цього застосовують імпульсне лазерне випромінювання з короткою тривалістю імпульсу (кілька десятків наносекунд) і високою піковою потужністю, що

забезпечує щільність потужності в зоні обробки $10^7 - 10^{10}$ Вт/см² при діаметрі сфокусованої плями пучка лазера приблизно 0,5 мм, з енергією в імпульсі кілька міліджоулей і частотою проходження імпульсів більше 20 кГц.

У неруйнівному режимі очищення поверхні твердого тіла від плівок, так само як і від забруднюючих частинок, проводиться на низькоенергетичних режимах, щоб запобігти руйнуванню поверхневих шарів або виникненню в них небажаних фізичних та хімічних змін. Наприклад очищення металеві деталі від корозії.

Розрізняють механізми і технології сухого та волого лазерного очищення, при яких вплив випромінювання відбувається безпосередньо на поверхню, яка очищується (в разі сухого очищення), або на поверхню, що попередньо покрита тонким шаром рідини (в разі вологого очищення).

Ударно-механічне лазерне очищення (рис. 4.4).

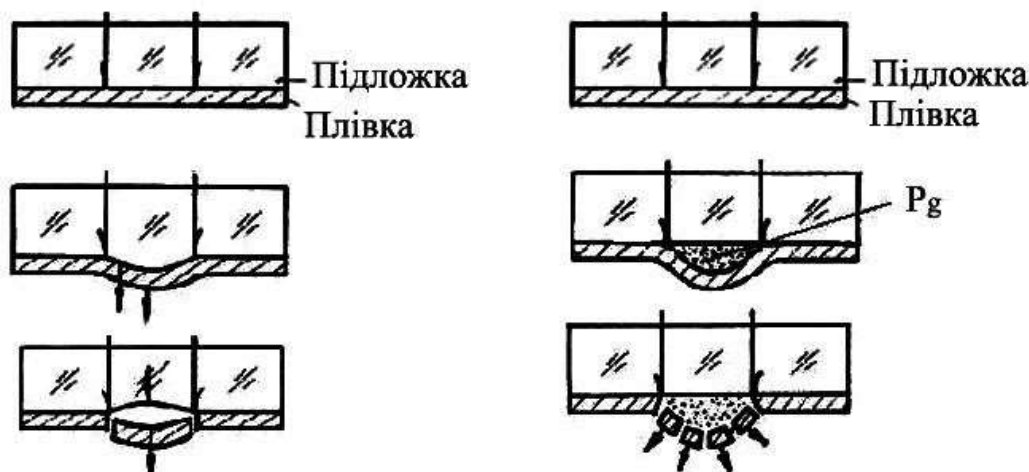


Рис. 4.4. Неруйнівні механізми лазерного очищення

Сухе лазерне очищення починається з швидкого теплового розширення поверхневого шару основного матеріалу та забрудненого шару під дією коротких імпульсів лазерного випромінювання [42], яке призводить до виникнення механічних напружень в забрудненому шарі та інерційної сили при припиненні імпульсу (рис. 4.5).

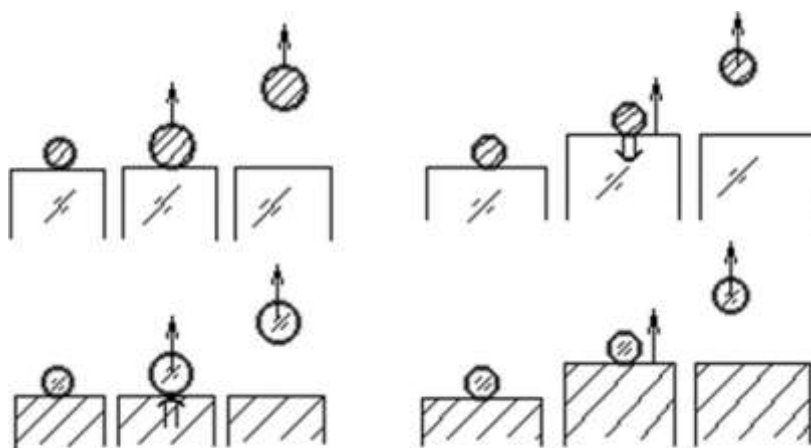


Рис. 4.5. Ілюстрація фізичних механізмів сухого лазерного очищення поверхні для випадків різного поєднання прозорих і непрозорих забруднень та основного матеріалу (метал, скло)

Іншим можливим фізичним механізмом сухого лазерного очищення поверхні від забруднюючого (корозійного) шару є викид його фрагментів з поверхні в результаті дії в ньому термічних напружень стиску. Теплове розширення пружного шару призводить до виникнення в ньому термічних напружень стиску, що може бути причиною пошкодження і руйнації окисної плівки.

Розглянемо докладніше цього фізичного механізму. При лазерному нагріві поверхневого шару відбувається його термічне розширення. За відсутності можливості миттєвої зміни його розмірів це термічне розширення перетворюється в напруження від самостискання. У свою чергу, ця енергія стискання плівки перетвориться в кінетичну енергію руху фрагментів шару окису від поверхні металу деталі.

При цьому енергія стискання шару може повністю витрачатися на енергію його руху, а може частково йти на подолання сил адгезії. Перевищення сил адгезії може статися і в результаті підвищення тиску в порожнині між забрудненням і підкладкою при нагріванні, наприклад, через десорбцію газів, при газифікації тонкого приповерхневого шару основного матеріалу (в разі, коли він менш термостійкий, ніж матеріал окисної плівки) та ін.

Фізичний механізм видалення плівки з поверхні твердого тіла, первинність котрого переважає в «довипарному» режимі лазерного опромінення залежить від пружних властивостей конкретного матеріалу поверхневого шару і його структурної будови.

Вологе лазерне очищення поверхні від сильно поглинаючих випромінювання забруднень (наприклад, металевого пилю) має свої особливості.

В цьому випадку випромінювання поглинається поверхневим шаром, уздовж всієї поверхні формується хвиля випаровування рідини, причому ефективно випаровування відбувається у вузькій області поблизу поверхні, що відповідає температурі кипіння $T_{\text{кп}}$.

Процес очищення в рідині полягає у випаровуванні шару рідини (нагадаємо, що для випаровування водних розчинів їх досить нагріти всього до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ або трохи вище), кипіння якого руйнує і виносить забруднення. При поглинанні лазерного випромінювання в основному матеріалі рідини поблизу його поверхні нагрівається до температури, яка перевищує температуру її кипіння при нормальному тиску, що призводить до ініціювання об'ємного (бульбашкового) кипіння рідини і відповідно пошкодження поверхневого окисного шару поверхні матеріалу очищуваної деталі

При вологому лазерному очищенні поверхню перед обробкою покривають тонким шаром рідини (рис. 4.6).



Рис 4.6. Ілюстрація фізичних механізмів вологого очищення поверхні:
 а – поглинання випромінювання часткою; б – поглинання випромінювання підкладкою

Природно, що енергетичні витрати на створення енергетичного сфокусованого променя при вологому способі лазерного очищення в 2 – 3 рази нижче, ніж сухого способа очищення.

При необхідності очищення поверхні в області механічних дефектів (подряпини, тріщини та ін.) та запущених корозійних процесах обробка поверхні в довиварних режимах зазвичай виявляється недостатньою для повного видалення корозійного шару. В цьому випадку, зазвичай, проводять також додаткову локальну обробку поверхні у випарному режимі.

4.3. Вибір обладнання та режимів для лазерного очищення

Для визначення ефективності режиму лазерного очищення матеріалів скористаємось відомими характеристиками взаємодії оптичного випромінювання із поверхнею на яку діє енергія падаючого потоку лазерного випромінювання. Взаємодія з матеріалом поділяється на трьох складових – відбитого, поглиненого і випромінювання, що пройшло крізь матеріал. Зі зменшенням довжини хвилі збільшується енергія лазерного випромінювання (відповідно до формули Планка)

$$E = \frac{ch}{\lambda} \quad (4.3)$$

де c – швидкість світла у вакуумі;

h – стала Планка;

λ – довжина хвилі.

Відбите випромінювання і випромінювання, що пройшло крізь матеріал,

не віддає енергію матеріалу, таким чином, очищення визначається лише кількістю поглиненої енергії.

Поглиняльна здатність залежить від довжини хвилі падаючого випромінювання, яка також визначає його потужність. Зі зменшенням довжини хвилі зменшується відбивна здатність матеріалів, а, отже, більша кількість енергії буде поглинена оброблюваним матеріалом. Розглянемо процес і визначимо режими лазерного очищення для найбільш поширених сталевих, або залізних деталей. Найбільш характерним забрудненням для сталевих виробів є іржа (оксид заліза Fe_2O_3). Зважаючи на те, що нагрівання металу під час очищення є небажаним, для виконання очищення можна запропонувати використання CO_2 -лазера, випромінювання якого селективно: добре поглинається іржею, і погано – основним металом.

Газові CO_2 -лазери та Неонові лазери (рис. 4.7) є найбільш поширеними завдяки порівняно невеликим габаритам, відсутності системи прокачування і простоті обслуговування. Вони мають рівні потужності випромінювання до десятків – сотень ват, ККД в десятки процентів і термін служби в тисячі годин [43]. У цих лазерах використовується спеціальна суміш газів CO_2 , N_2 і He. Генерація монохроматичного когерентного випромінювання відбувається на електронному енергетичному переході між двома коливальними рівнями молекули CO_2 , а N_2 (інертний газ) і He використовуються для підвищення ККД).

Ці лазери були першими і багатий досвід їх використання призвів до того, що зараз вони є одними з найпотужніших (приблизно 80 кВт) і найбільш ефективних (ККД приблизно 15 – 20 %). Довжини хвиль генерації оптичного випромінювання знаходиться в інфрачервоній частині оптичного спектру випромінювання і становлять 10,6 і 9,5 мкм.

Через близьке розташування лазерних рівнів до основного має місце сильна температурна залежність інверсії електронної енергії, що зобумовлює наявність використовувати примусове водяне охолодження розрядної трубки

газової суміші.

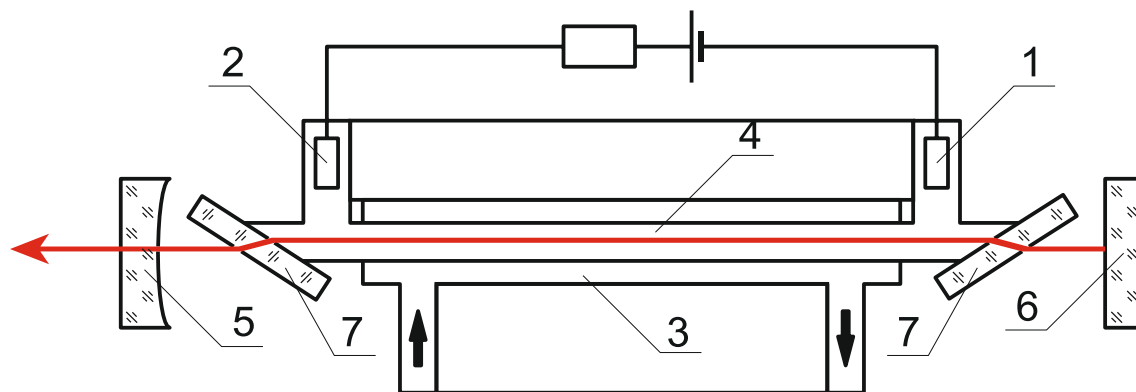


Рис. 4.7. Структурна а схема розрядної трубки CO_2 -лазера □ 1 – катод; 2 – анод; 3 – оболонка водяного охолодження; 4 – розрядний капіляр; 5 – «напівпрозоре» дзеркало; 6 – «глухе» дзеркало; 7 – вікна Брюстера.

Принцип дії CO_2 -лазера полягає в тому, що висока напруга проходить через газову суміш, яка містить вуглекислий газ, у герметичній трубці, збуджуючи молекули і змушуючи їх випромінювати інфрачервоне світло. Азот виступає як активатор, а гелій допомагає охолодити молекули CO_2 , передаючи енергію, щоб утворився когерентний лазерний промінь. Цей промінь формується між дзеркалами і через напівпрозоре дзеркало потім фокусується лінзою і використовується для різних процесів, а саме різка матеріалів або абляція (випарювання) тканин.

Конструктивно генератори кисню виготовляються у вигляді металевих циліндрів з денцем і розташовуються або на окремому ввіді, або об'єднуються з катодом. Зважаючи на хімічну активність робочої суміші використовуються тільки холодні катоди-циліндри, зігнуті з молібденової або танталової жерсті. Аноди виготовляють з молібденових штирів або коварових кілець, співвісних з розрядним капіляром [41].

Вихідні вікна (Ge, GaAs) з'єднують з розрядною трубкою або за допомогою клею, або за допомогою пайки з коваровим наконечником, привареним в свою чергу до скляного торцю трубки. Пропускання германію різко погіршується навіть при незначному перевищенні температури над

звичайною кімнатною. Це призводить до необхідності гарного тепловідводу оптичних деталей з германію.

Арсенід галію менш чутливий до температури навколишнього середовища в порівнянні з германієм, але коштує значно дорожче. Вікна Брюстера з'єднують зі скляною трубкою через проміжну металеву деталь за допомогою пайки. Для «глухого» дзеркала зазвичай користуються металами: нержавіючою сталлю, різними мідними сплавами та ін. [41].

За допомогою лазера можна ефективно видаляти лакофарбові покриття великої товщини і рихлу іржу глибиною до 0,8 мм. Однак всі дослідження, описані раніше проводилися в стаціонарних умовах з використанням комбінованих лазерних установок [43]. В таких установках в якості додаткового джерела енергії можуть використовуватися імпульсні або безперервні лазери з різною потужністю і довжиною хвилі.

Очищення від іржі сталевих конструкцій мостів, ЛЕП, башт телевізійних та мобільних передавачів тощо в так званих польових умовах за допомогою лазерів не проводилося.

Для очищення від іржі сталевих конструкцій використовували установку на базі CO₂-лазера потужністю 130 Вт. Для забезпечення мобільності та зручності використання установки ручний лазерний сканатор з'єднаний з установкою за допомогою оптичного волокна. Переміщення лазерного пучка можливе як в автоматичному, так і в ручному режимі.

Дослідження проводились на зразках із вуглецевих сталей марок Ст3, Ст5, сталь 20 з різним ступенем окиснення поверхні (рис. 4.8).

Якість очищення перевірялась візуально за допомогою мікроскопу Sigeta Expert при збільшенні 100. Ступінь очищення від окалини та іржі визначають за допомогою пластини з прозорого матеріалу з взаємно перпендикулярними лініями, що утворюють квадратики розмірами 2,5 × 2,5 мм, яку пересувають по поверхні виробу [44]. Ступінь очищення є відношенням числа квадратиків, зайнятих окалиною та іржею, до загальної кількості

квадратиків, вираженим у відсотках. Більш детально поверхня досліджувалась шляхом вимірювання мікротвердості та шорсткості поверхні.

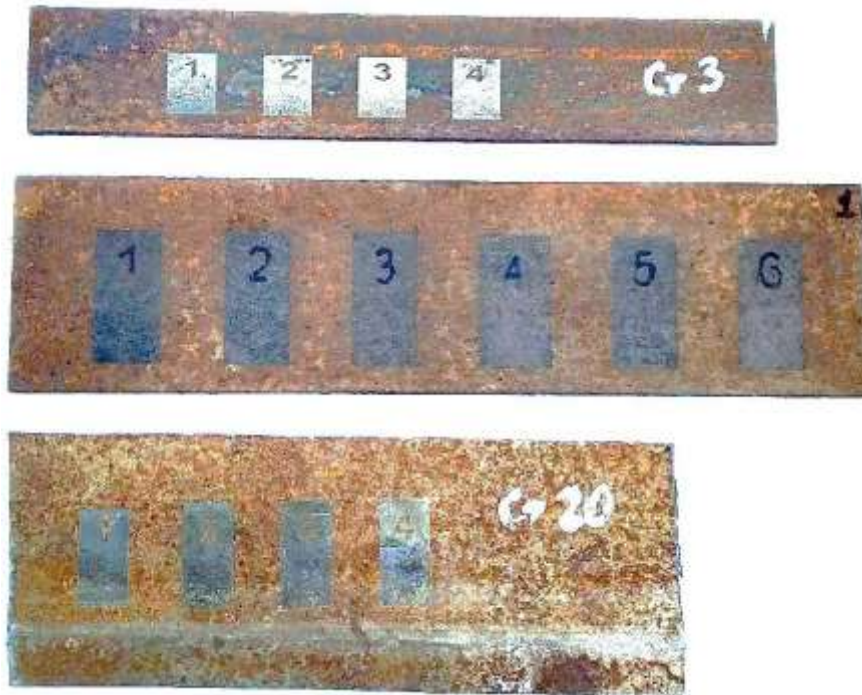


Рис. 4.8. Сталеві зразки

Шорсткість утворює мікрорельєф поверхні деталі (рис. 4.9). Це важливий показник в технічній характеристиці виробу, що впливає на експлуатаційні властивості деталей.

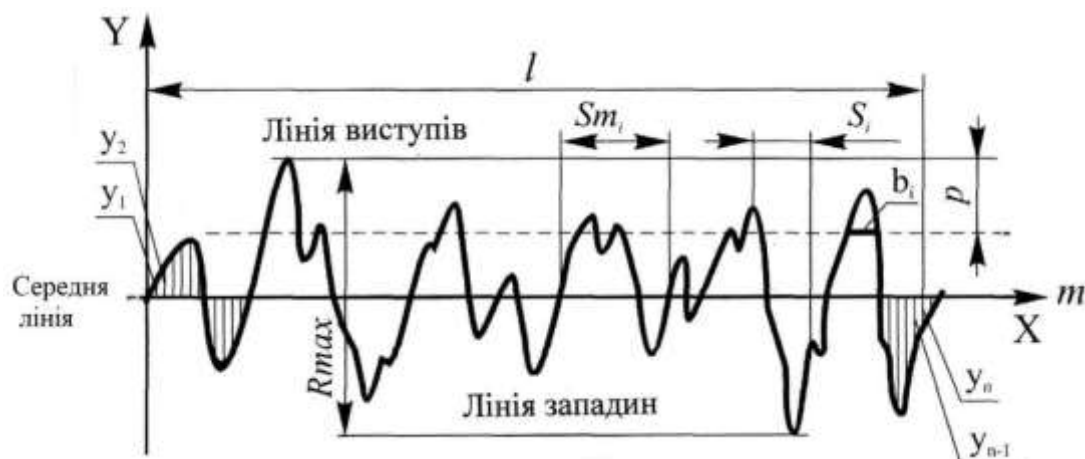


Рис. 4.9. Дійсний профіль (профілограма) поверхні та параметри шорсткості.

При визначенні числових значень шорсткості поверхні відлік проводять

від єдиної бази, за яку прийнята середня лінія профілю m .

Вимірювання проводять в межах базової довжини l , тобто довжини ділянки поверхні, вибраної для вимірювання шорсткості поверхні без урахування інших видів нерівностей (наприклад, хвилястості). Кількісно шорсткість поверхні оцінюють основними параметрами (одним або кількома) [44].

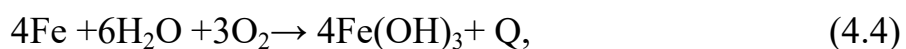
Основними параметрами шорсткості є: R_a – середнє арифметичне відхилення профілю; R_z – висота нерівностей профілю за 10 точками; R_{max} – найбільша висота поверхонь профілю; S_m – середній крок нерівностей профілю; S – середній крок нерівностей профілю за вершинами; t_p – відносна опорна довжина профілю. Шорсткість поверхні вимірювалася контактним способом за допомогою профілометра TR-200.

Шорсткість сталевих виробів, призначених для фарбування, повинна бути R_z 40 – 60 мкм, тому якісним вважається очищення, що забезпечує таку шорсткість при ступені очищення не менше 90 %.

4.4. Розробка режимів лазерного очищення від іржі і технологічних забруднень

Лазерне очищення від іржі є одним із складних видів обробки. Товщина шару і фізико-хімічні властивості іржі можуть змінюватися в межах однієї ділянки, тому вибір режимів очищення – складне завдання.

Під дією кисню повітря при наявності водяної пари метал (за лізо) окислюється з утворенням гідроксиду заліза $Fe(OH)_3$



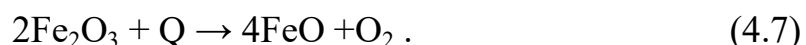
Гідроксид заліза (III) дуже нестійкий, швидко втрачає воду і перетворюється в оксид заліза (III) Fe_2O_3 . Це з'єднання не захищає поверхню заліза від подальшого окиснення. В результаті залізний предмет може бути повністю зруйнований.

Цей процес супроводжується виділенням тепла і використовується для підвищення ефективності лазерного різання.

При нагріванні до 500 – 600°C і вище утворюється оксид FeO (окалина)

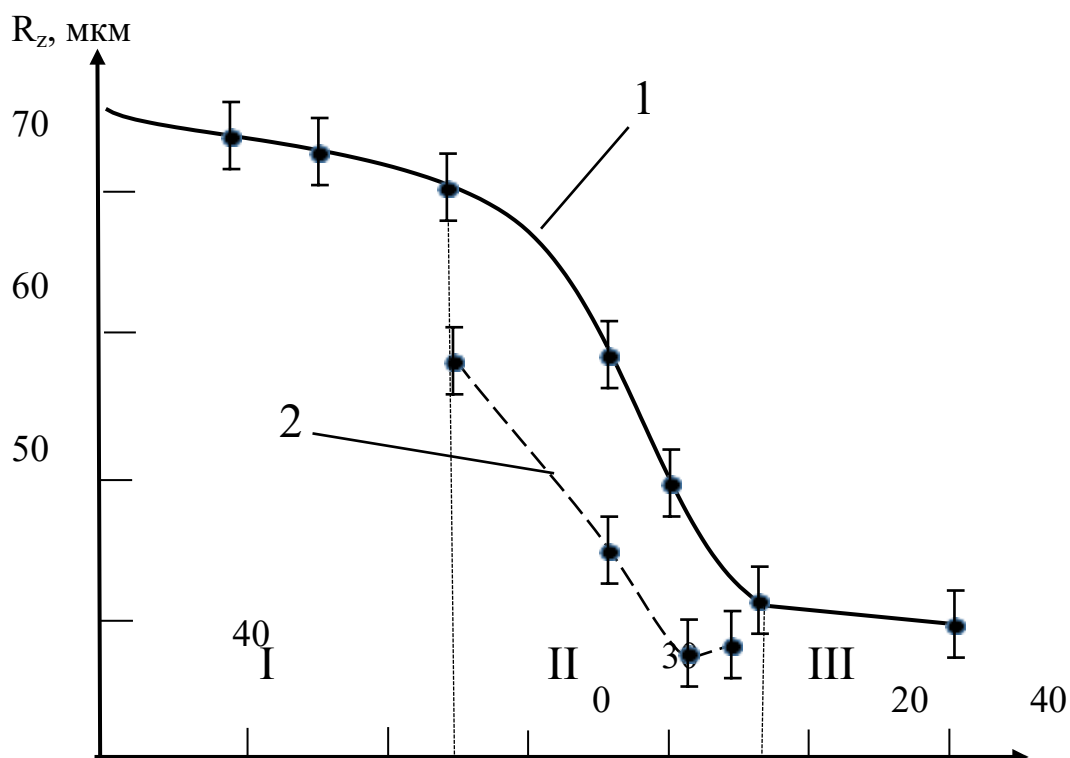


Утворенням окалини супроводжуються процеси термічної обробки і зварювання. Лазерне випромінювання викликає швидкісне нагрівання до температур 900 – 1300 °C. Під дією лазерного променя на окисленій поверхні відбуваються такі реакції



Відновлення металу з оксидів вимагає великої кількості енергії, джерелом якої в даному випадку є лазер.

Дослідження проводилися на зразках з шаром іржі 0,6 – 0,8 мм. Залежність шорсткості поверхні від потужності випромінювання переходить в більш стійкий стан при звільненні атомів кисню [15].



60

80

а

100 P ,

Вт



б

Рис. 4.10. Графік залежності шорсткості (а) та структури поверхні (б) від потужності лазерного випромінювання

Найбільш істотно на процес очищення впливає енергія опромінення, яка визначається через добуток потужності (інтенсивності випромінювання) на тривалості обробки випромінюванням, яка саме визначає кількість тепла, що потрапляє на оброблювану поверхню. Тому одного і того ж ефекту можна досягти при меншій інтенсивності щільності пучка випромінювання але більшій тривалості обробки і таку ж дію можна отримати при більшій потужності лазерного променя, але меншій тривалості дії лазера. В даних дослідженнях обробка поверхні проводилась в імпульсно-періодичному режимі при незмінних умовах фокусування, частоті проходження. Залежність глибини обробки від потужності випромінювання та кількості проходів наведена на рис 4.10.

Аналізуючи вище приведені криві можна зазначити наступне:

На кривій 1, яка характеризує залежність шорсткості поверхні від енергії випромінювання простежуються три зони процесу очищення матеріалу

Зона I – характеризується частковим випаровуванням іржі, високою шорсткістю поверхні та відсутністю металізації приповерхневого шару.

В зоні II – іржа майже повністю випаровується, шорсткість поверхні зменшується, частковою або повною металізується приповерхневий шар.

Для зони III характерні повне випаровування іржі, середня шорсткість

поверхні, повна металізація та оплавлення приповерхневого шару.

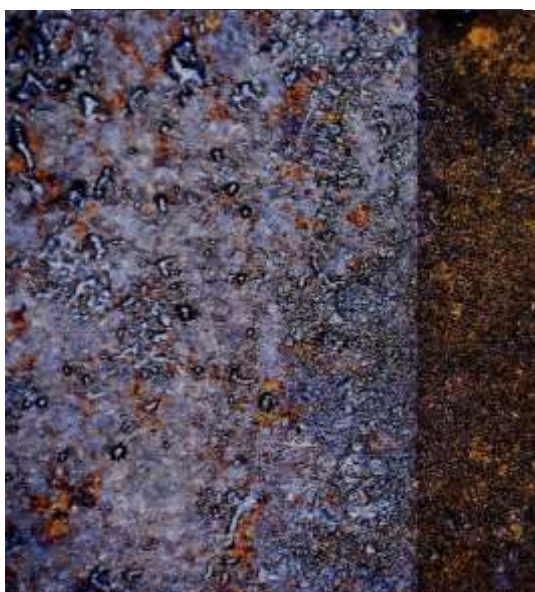
Дослідження поверхні показали, що потужність випромінювання ванни має суттєвий вплив на якість очищення при одній і тій же тривалості процесу опромінення. Зокрема, результати дослідження свідчать, що при потужності до 50 Вт шорсткість поверхні практично не змінюється. Металографічні дослідження показують, що на поверхні іржі спостерігається металізація її верхніх шарів, форма частинок іржі глобулярна, розміри глобул різні (рис. 4.11, а).

Аналіз візуальних зразків обробленої поверхні при різних потужностях показав, що зі збільшенням потужності металізація поверхні збільшується, а при потужності більше 95 Вт починається оплавлення поверхні.

При потужності 30 – 50 Вт (рис. 4.11, а – б) залишаються неметалізовані ділянки, очевидно, що одного проходу при очищенні від забруднень товщиною 0,6 – 0,8 мм недостатньо.

При роботі в декілька, зокрема, два проходи, можливе таке розподілення потужності між проходами: перший прохід менш потужний, ніж другий; перший

Обробка однаково потужними проходами сприяє оплавленню поверхні вже при 75 – 80 Вт.



а

б



в

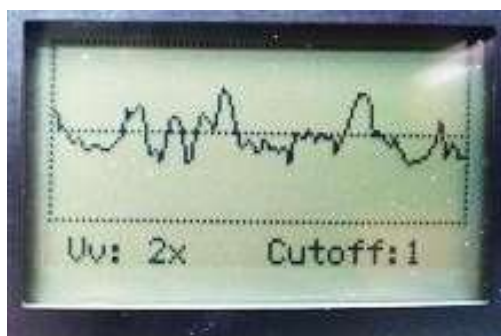


г

Рис. 4.11. Вид поверхні сталевих зразків до і після очищення від іржі в один прохід при потужностях а – 30 Вт; б – 50 Вт; в – 70 Вт; г – 90 Вт

Варіант обробки, при якому потужність другого проходу менша, ніж першого, виявився найбільш результативним.

Крива 2 на рис. 4.10 характеризує залежність шорсткості поверхні від потужності випромінювання для двох проходів при постійній потужності другого у 50 Вт. Найкращий результат був отриманий при режимі 8 (рис. 4.12), потужність першого проходу 80 Вт.



а

б

Рис. 4.12. Вид поверхні (а) та профілографа (б) сталевого зразка післяочищення від іржі у два проходи

Результати досліджень показують, що обробка в два проходи сприяє повній металізації (очищенню) поверхні із шорсткістю 33 – 45 мкм без оплавлення поверхневого шару.

Результати дослідження показують, що для очищення лакофарбових покриттів можна рекомендувати потужність лазерного пучка від 20 Вт до 50 Вт в залежності від кількості шарів лакофарбового покриття. Якщо забруднення є більш складне або наявна комбінація з іржею, то слід рекомендувати проводити процес очищення за два проходи.

Експериментальні дослідження також підтвердили, що на якість лазерного очищення істотно впливають параметри фокусування лазерного випромінювання (діаметр плями фокусування на поверхні обробки, фокусна відстань оптичної системи, наявність та ступінь поляризації випромінювання, розподіл щільності потужності за перетином пучка і наявність зміщення фокальної площини відносно поверхні оброблюваного матеріалу.

Для прикладу, на промисловій лазерній установці можна змінювати положення фокальної площини відносно оброблюваної поверхні і, відповідно, пов'язаний з цим параметром діаметр плями фокусування (площі оброблюваної поверхні). На рис. 4.13 наведені можливі схеми положення фокальної площини відносно оброблюваної поверхні.

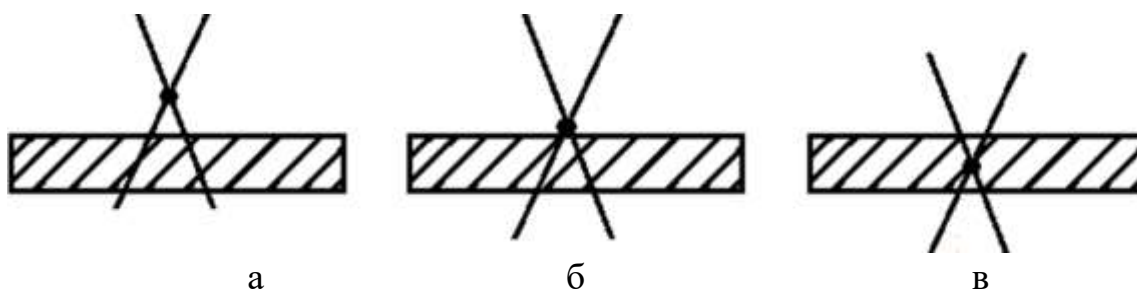


Рис. 4.13. Положення фокальної площини

Нижче на рис. 4.14 показано реальні фото різниці якості обробки

поверхні при різних умовах фокусування, тобто при різних інтенсивностях потужності опромінення на одиницю опромінюваної площі поверхні.

Аналізуючи отримані результати очищення для різного положення фокальної площини (рис. 4.14), можна констатувати, що положення фокальної площини на поверхні (б) є оптимальним положенням для очищення поверхні за допомогою цієї установки.



а

б

Рис. 4.14. Вид поверхні сталевго зразку після очищення при різних умовах фокусування.

Запропонована технологія лазерного очищення сталевих конструкцій у польових умовах дозволяє отримати необхідну якість поверхневого шару навіть у випадку нерівномірного корозійного впливу і зменшити втрати сталі при обробці у два проходи за рахунок повної металізації поверхні (з продуктами корозії у вигляді іржі) без оплавлення поверхневого шару.



Висновки до розділу. Корозія сильно скорочує термін експлуатації виробів з металу і тим самим наносить значну шкоду економіці країни.

Щорічно через корозію безповоротно втрачається 10...12 % чорних металів Країна несе величезні матеріальні втрати в результаті корозії мостових і морських конструкцій, опор контактної мережі і ліній електропередачі, віадуків, шляхопроводів та інших конструкцій.

Корозія призводить до зменшення надійності роботи обладнання. Тому в розділі багато уваги приділено лазерному очищенню поверхні від окисних плівок, продуктів корозії, окалини, технологічних забруднень для отримання необхідної якості і проведення подальших технологічних операцій. Розроблені рекомендації з використання для очищення від іржі сталевих конструкцій мостів, ЛЕП, башт телевізійних та мобільних передавачів та ін. в так званих польових умовах за допомогою CO₂-лазеру в імпульсно-періодичному режимі.

ВИСНОВКИ

1. В останні роки технологія лазерного маркування все більш широко використовується в народному господарстві, поліграфії і може успішно застосовуватися для багатьох матеріалів: пластику та гуми, паперу і картону, дерева та шкіри. На сьогодні лазерне маркування займає 90% ринку.

2. Використання лазерної обробки є доцільним і для гравірування та маркування. В результаті експериментів із застосуванням Nd:YAG-лазера було отримано поєднання гравірування з частковим кольоровим контрастом. Встановлено, що твердотільний Nd:YAG- лазер може використовуватися для гравірування на поверхні і одержання монохромних зображень на сувенірній продукції. Повнокольорове лазерне маркування може бути одержано тільки за допомогою волоконного лазера. Лазерне маркування може рекомендуватися як для металевих, так і неметалевих матеріалів.

3. 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.

4. Використання лазерної обробки є доцільним і для гравірування та маркування і для очищення поверхонь. Перспективним напрямом використання малопотужних лазерів для термічного зміцнення сталей є збільшення поглинальної здатності поверхні за рахунок зменшення довжини хвилі випромінювання - гартування сталей УФ-випромінюванням (з довжиною хвилі $\lambda = 0,355$ мкм) малої потужності (5 – 10 Вт) в імпульсному режимі без оплавлення поверхні.

5. Багато уваги приділено в роботі лазерному очищенню поверхні від окисних плівок, продуктів корозії, окалини, технологічних забруднень для отримання необхідної якості і проведення подальших технологічних операцій. Розроблені рекомендації з використання для очищення від іржі сталевих конструкцій мостів, ЛЕП, башт телевізійних та мобільних передавачів та ін. в так званих польових умовах за допомогою CO₂-лазера в імпульсно-періодичному

режимі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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/etr2015voll.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. 35

11. Поліщук, А., Гарбар, Є., Поліщук, О., Дука, О., & Гергель, М. (2025). Моделювання операції лазерного гравіювання з використанням програмного середовища robodk та робота-маніпулятора. *herald of khmelnytskyi national university. technical sciences*, 347(1), 500-505. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-68>

