

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П.

ЛАЗЕРНА ПОВЕРХНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

Монографія

Харків
2020

УДК 621.7.048 +621.7.048 + 621.785.68

ББК 34.2

Л17

Рецензенти:

Є. М. Одаренко, доктор фіз.-мат. наук, професор (Харківський національний університет радіоелектроніки);

В. В. Коломієць, доктор технічних наук, професор (Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка)

Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П.

Л17 **Лазерна поверхнева обробка матеріалів /**

Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П.

Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 100 с.

ISBN 978-617-7859-35-1

Розглянута взаємодія лазерного випромінювання з речовиною, поверхнєве лазерне зміцнення сталей, лазерне маркування металів і неметалів, лазерне очищення металів перед проведенням різноманітних технологічних операцій, що виконуються за допомогою сучасного лазерного устаткування, в тому числі малопотужних волоконних імпульсних лазерів. Надані рекомендації з використання волоконних лазерів при поверхневому гартуванні, маркуванні та очищенні металевих та неметалевих матеріалів.

Табл. 3. Іл. 49. Бібліогр. найм. 45.

Усі права захищені

УДК 621.7.048 +621.7.048 + 621.785.68

ББК 34.2

ISBN 978-617-7859-35-1

©Афанасьєва О.В., 2020

©Лалазарова Н. О., 2020

©Федоренко Є.П. 2020

© ХНУРЕ, 2020

© ХНАДУ, 2020

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].

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.

Унікальні фізичні властивості лазерного випромінювання – висока монохроматичність і когерентність, низька розбіжність випромінювання і його високі питомі енергетичні характеристики дозволили створити перспективний вид висококонцентрованого джерела енергії, який знайшов широке застосування в різних галузях науки і техніки, промисловості і, зокрема, в машинобудуванні [2] і приладобудуванні [3].

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 [1, 2].

Ось що говорить про лазерну обробку 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, рекристалізова-

ною, 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].

Значна частина різновидів лазерної обробки вже успішно застосовується в промисловості, а деякі перебувають у стадії дослідження. Висока ступінь концентрації енергії, відсутність необхідності ведення процесу у вакуумі (на відміну від електронно-променевої обробки) і внаслідок цього можливість обробки елементів конструкцій будь-яких розмірів, 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.

Доцільним виявляється 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. Кращим виявляється застосування лазерів при термічній обробці елементів електронних схем, коли оброблювані ділянки поєднуються з ділянками або деталями, що мають низькотемпературну стійкість, а також для мікророзмірних і локальних

термообробок. 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 ВЗАЄМОДІЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ

1.1 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 лазера, його пікової потужності і тривалості впливу на матеріал [4].

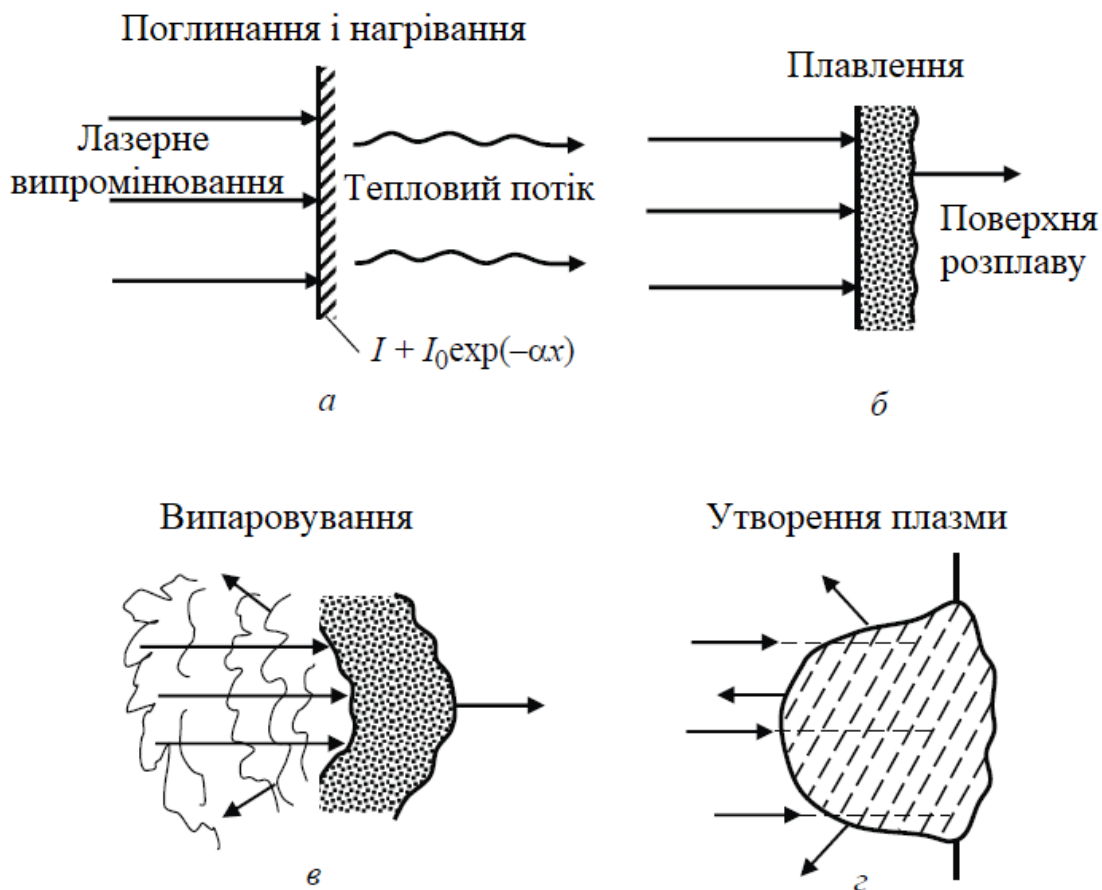


Рис. 1.1. Основні фізичні процеси, що виникають при взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною

Лазерне випромінювання, падаючи на оброблювану поверхню, поглинається відповідно до експоненціального закону Бугера-Ламберта

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

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).

Далі відбувається його нагрівання, 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 триває процес нагріву, на цей раз – до температури випаровування (кипіння). Після досягнення цієї температури ініціюється процес випаровування речовини з оброблюваної поверхні (рис. 1.1, в), що супроводжується іонізацією поверхневих домішок і забруднень, які практично завжди присутні в тому чи іншому вигляді. Далі випромінювання поглинається основним матеріалом, і, якщо інтенсивність недостатньо висока, матеріал плавиться, випаровується, а пари іонізуються. При цьому тиск парів сприяє вихлюпуванню розплаву і в матеріалі поступово формується отвір.

Якщо інтенсивність випромінювання надто велика, то в результаті випаровування утворюється високотемпературна непрозора плазма. Новоутворена плазма може поширюватися назустріч лазерному пучку в формі індукованої лазером хвилі поглинання. 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 [1].

Таким чином, при побудові будь-якого технологічного процесу, що реалізується за допомогою лазера, необхідно враховувати теплофізику лазерного нагрівання.

Вибір лазера для проведення певного виду обробки визначається специфікою впливу лазерного випромінювання на даний матеріал і особливостями поставленого технологічного завдання. Основними параметрами, що характеризують лазерне випромінювання, є потужність, довжина хвилі і тривалість впливу випромінювання, енергія і частота проходження імпульсів, а також когерентність, спрямованість, монохроматичність і поляризація випромінювання.

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. Для імпульсних лазерів розглядають потужність в імпульсі і середню потужність, яка залежить від тривалості та частоти проходження імпульсів.

Температура T , до якої нагрівається об'єкт впливу, 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

$$q = \frac{P_0 A}{S}, \quad (1.2)$$

де 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} (α – температуропровідність матеріалу, τ – 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) має вигляд

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1.3)$$

де t – час;

x, y, z – декартова система координат, пов'язана з опромінюваним тілом.

Гранична умова на поверхні задає дію поверхневого джерела

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q(x, y, t), \quad (1.4)$$

де $q = q_0 (1-R)$, q_0 – щільність потужності падаючого випромінювання;

R – коефіцієнт відбиття поверхні;

k – теплопровідність матеріалу, вісь z перпендикулярна поверхні і спрямована вглиб матеріалу.

Якщо розміри тіла, що нагрівається, досить великі ($(l_x, l_y, l_z \gg \sqrt{a\tau})$), а практично ≥ 1 мм для металів при $\tau = 10^{-3}$ с, його можна вважати напівнескінченим середовищем [1]:

$$T \Big|_{x \pm \infty} = T \Big|_{y \pm \infty} = T \Big|_{z \pm \infty} = T_H, \quad (1.5)$$

де T_H – початкова температура ($(T|_{t=0} = T_H)$).

Таким чином, з рішення рівняння теплопровідності в кожному конкретному випадку можна визначити зв'язок температури матеріалу, який опромінюється, $T(x, y, z, t)$, з щільністю потужності лазерного випромінювання q_0 , що дозволяє ввести поняття порогового значення щільності потужності випромінювання – такого, при яко-

му температура поверхні тіла в центрі опроміненої області до моменту закінчення дії випромінювання досягає заданого значення.

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 (1.3, 1.4, 1.5) для випадку постійної в часі і за площею опроміненої зони щільності потужності випромінювання q

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k} \left(\frac{1}{\sqrt{\pi}} - f \frac{r_0}{2\sqrt{a\tau}} \right) + T_H, \quad (1.6)$$

Вираз (1.6) має два окремих випадки, що безпосередньо впливають із нього:

а) при $r_0 \gg \sqrt{a\tau}$ (імпульсне нагрівання)

$$T = \frac{2q_0(1-R)\sqrt{a\tau}}{k\sqrt{\pi}} + T_H, \quad (1.7)$$

б) при $r_0 \ll \sqrt{a\tau}$ (стаціонарний режим нагрівання)

$$T = \frac{q_0(1-R)r_0}{k} + T_H, \quad (1.8)$$

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. При використанні імпульсних лазерів тривалість впливу визначається тривалістю імпульсу випромінювання τ . Тривалість дії лазерів, що працюють в безперервному режимі, залежить від швидкості сканування $V_{ск}$ лазерного пучка по поверхні матеріалу

$$\tau = \frac{2r_0}{V_{ск}}, \quad (1.9)$$

Частота проходження імпульсів визначає продуктивність обробки.

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 когерентність випромінювання має в багатопроменевих лазерних системах, коли при узгодженні фаз випромінювання окремих лазерів сумарна інтенсивність багатопроменевої системи значно перевищує суму інтенсивності випромінювання кожного лазера окремо (багатопроменеві CO₂-лазери, напівпровідникові лазерні матриці тощо).

Когерентність випромінювання пов'язана із спрямованістю пучка випромінювання, його монохроматичністю і поляризацією.

Спрямованість пучка випромінювання характеризується кутом розходження пучка і просторовим розподілом інтенсивності. Розподіл інтенсивності випромінювання на вихідній апертурі лазера визначається типом використовуваного резонатора і модовим складом випромінювання.

Теоретична дифракційна розбіжність пучка залежить від довжини хвилі випромінювання λ і діаметра пучка на виході лазера $2w_G$. Профіль радіального розподілу інтенсивності випромінювання зберігається в міру віддалення від лазера тільки для гауссових пуч-

ків. Для визначення кута розбіжності пучків з довільним розподілом інтенсивності розглядають розподіл інтенсивності в дальній зоні ($x \gg w_0^2/\lambda$, де w_0 – радіус вихідного вікна лазера).

Для одномодового лазера цей розподіл описується розподіленням Гауса

$$I(w) = I_0 \exp(-w^2 / w_G^2), \quad (1.10)$$

де I_0 – інтенсивність випромінювання на осі пучка;

w – поточний радіус (відстань до осі пучка);

w_G – радіус, при якому інтенсивність випромінювання знижується в e разів.

Теоретична розбіжність випромінювання багатомодових лазерів визначається кутом дифракційної розбіжності $\theta = 1.26 \frac{\lambda}{2w_0^{min}}$, в якому міститься 85 % енергії пучка. Тут – w_0^{min} мінімальний радіус області генерації на вихідному вікні лазера, що залежить від числа поперечних мод.

Число поперечних мод визначає число зон на вихідній апертурі лазера, в яких вони зосереджені; відповідно характерний розмір цих областей зменшується зі збільшенням числа поперечних мод, що призводить до збільшення розходження випромінювання. Поперечний розподіл інтенсивності поздовжніх мод на виході резонатора однаковий, вони відрізняються лише частотами випромінювання.

При рівномірному розподілі інтенсивності випромінювання на виході лазера (при дуже великому числі мод) кут розходження визначається класичною дифракцією. На рівні першого дифракційного мінімуму (86 % енергії) цей кут дорівнює $\theta = 2,44 \lambda / D$, де D – діаметр пучка на виході з лазера. В реальних умовах експериментальна величина розходження випромінювання θ перевищує теоретичну дифракційну межу.

Розбіжність пучка випромінювання θ визначає можливості його фокусування. Мінімальний розмір плями в фокусі визначається

виразом, що випливає з геометричної оптики телецентричних пучків (взаємно паралельні промені, що перетинаються в одній і тій же точці фокальної площини, рис. 1.2):

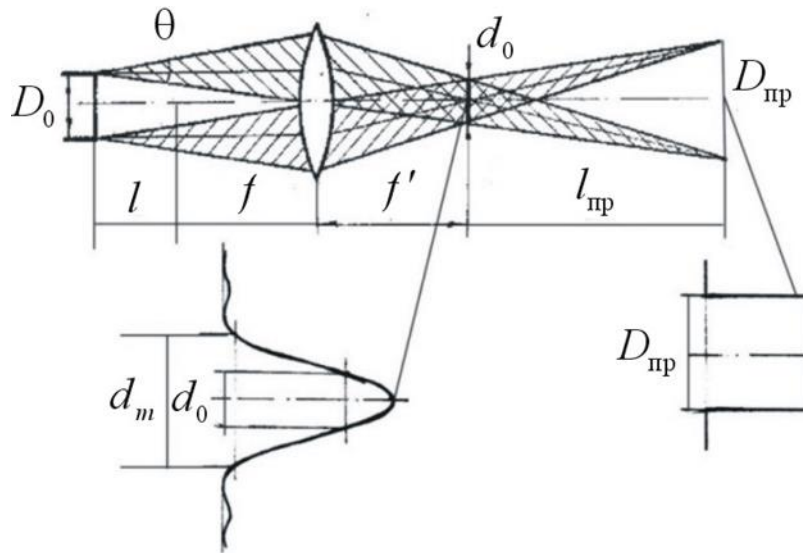


Рис. 1.2. Телецентрична модель лазера спільно з оптичною системою

$$d_0 = \theta f, \quad (1.11)$$

де θ – повний кут розходження пучка;

f – фокусна відстань оптичної системи.

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

В окремих випадках лазерної обробки необхідно враховувати поляризацію випромінювання, зокрема, в технологічних процесах, при яких відбувається багаторазове відбиття випромінювання під кутами, близькими до кута Брюстера (коли p -складова поляризованого випромінювання повністю відбивається від поверхні). Прикладом такого технологічного процесу є різання металевих матеріалів великої товщини [1].

1.2 Особливості лазерного випромінювання як інструменту

Лазерний промінь має значно вищу інтенсивність в порівнянні зі звичайним джерелом світла. Через це при попаданні його на матеріал виникають нові умови взаємодії.

Іншою особливістю є короткочасність впливу високої щільності потужності для імпульсних лазерів (вимога: в тонкому поверхневому шарі на довжині поглинання повинна виділятися велика частка енергії падаючого випромінювання).

Глибина шару, який поглинає випромінювання, становить приблизно 10^{-5} см, градієнт температури досягає 10^8 К/см, і швидкість зміни в часі 10^{10} К/с.

За нормальних умов закон поглинання виражається співвідношенням (1.1). Але починаючи з певної щільності потужності лазерного випромінювання, поглинання може приймати більш високі значення, ніж це можна очікувати за рівнянням (1.1). Внаслідок нелінійності процесів взаємодії між лазерним світлом і опроміненою зоною з'являється аномальне поглинання. При перевищенні порогової інтенсивності непоглинаючі речовини стають також поглинаючими. До початку основного впливу лазерного випромінювання (початкова фаза менше 10^{-7} с) відбиття може змінитися поглинанням. Критична інтенсивність залежить від довжини хвилі лазерного випромінювання, характеристик лазерного пучка і від матеріалу. Відомо, що при інтенсивності вище критичної, дуже добре поглинають практично всі речовини.

Для збільшення ефективності лазерної обробки вигідно перевести речовину в поглинаючий стан під дією первинного імпульсу. Такий імпульс повинен мати наступні властивості: час наростання менше 1 мкс, інтенсивність лазерного випромінювання більше 10^7 Вт/см², тривалість імпульсу менше 10 мкс. Іншими можливостями зміни поглинаючих властивостей поверхні є матування поверхні, нанесення неметалевого шару (термічне оксидування, аноду-

вання, хімічна обробка), нанесення порошків кольорових пігментів [4].

Поглинання в металах відбувається в шарі товщиною 10^{-6} – 10^{-5} см. Сфокусований лазерний промінь на поверхні виробу можна уявити для металу як двовимірне джерело тепла. Для великого числа діелектриків і напівпровідників лазерне випромінювання не можна розглядати як поверхневе джерело.

Видалення матеріалу стає можливим завдяки утворенню парової та рідинної фаз. Падаюча на оброблюваний виріб енергія приводить до локального випаровування металу. Зона випаровування локалізується під вихідною поверхнею виробу на глибині 0,05 – 0,1 мкм. Завдяки цьому частина матеріалу, що розплавився за рахунок теплопровідності, видаляється у вигляді крапельок при вибуховому розширенні в зоні обробки.

Критичним є урахування відбивної здатності. 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. Тому для багатьох обробок з видаленням матеріалу 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 лазерне випромінювання. Для цього необхідні коротко діючі імпульси (10^{-6} – 10^{-9} с). Важною характеристикою є також структура імпульсів.

1.3 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. 1.3 [4].

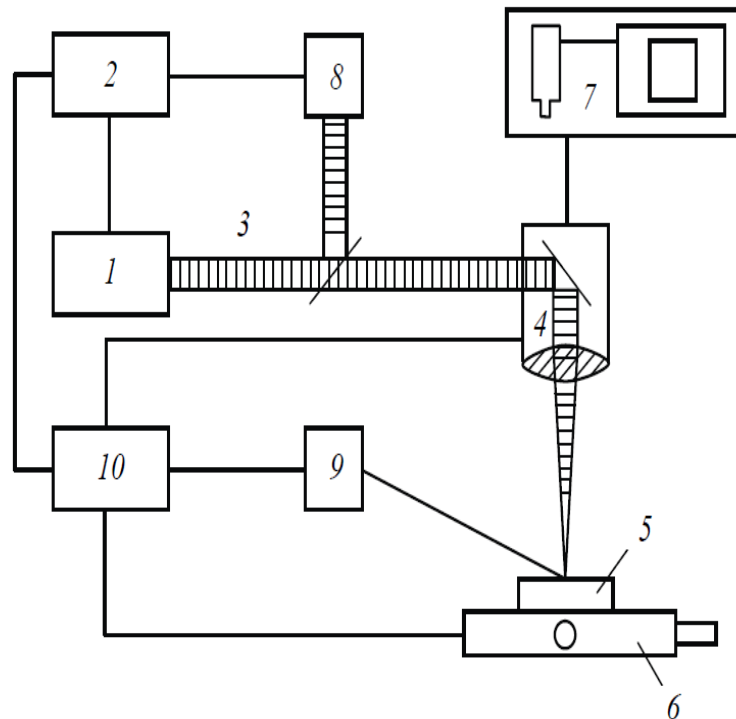


Рис. 1.3. Узагальнена функціональна схема технологічної лазерної установки: 1 – лазерний випромінювач, 2 – блок живлення лазера, 3 – пучок лазерного випромінювання, 4 – фокусуюча оптична система, 5 – оброблювана деталь, 6 – координатний стіл, 7 – система візуального контролю зони лазерної обробки, 8 – система контролю параметрів лазера, 9 – система контролю технологічного процесу, 10 – мікропроцесор

Фокусуюча оптична система служить для фокусування лазерного пучка на поверхні оброблюваного об'єкта в світлову пляму такого розміру, що дозволяє забезпечити рівень щільності потужності, достатній для виконання необхідної технологічної операції. Крім того, для більш ефективної роботи лазера вона повинна забезпечити максимально можливе використання енергії лазерного випромінювання з урахуванням втрат на всіх оптичних елементах лазерної установки (що виникають через френелівське відбиття, залишкове поглинання та ін.). Також в її завдання входить формування зобра-

ження зони обробки заданої і строго просторово-окресленої форми (включаючи формування зображення зони впливу з мінімальними нерівностями краю).

Електромеханічний координатний стіл призначений для високоточного переміщення оброблюваної деталі щодо області фокусування лазерного пучка. У найпростішому випадку це може бути двохкоординатний транслятор, але бувають і більш складні конструкції – трьохкоординатні (з переміщенням уздовж осі падаючого лазерного пучка), а також столи з осьовим обертанням і п'ятикоординатні роботизовані транслятори, в яких фокусуюча насадка, поєднана з волоконно-оптичним кабелем, переміщається в просторі в «руці» робота.

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 ТВ-камери, що дає можливість спостерігати її на РК-екрані і фіксувати весь технологічний процес в пам'яті комп'ютера або на відеоносіях інформації (CD- і DVD-дисках).

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 .

Розглянемо правила вибору цих параметрів.

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

$$q_H = kT_B / (Ar_0), \quad (1.12)$$

де k – коефіцієнт теплопровідності;

T_B – температура випаровування;

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

r_0 – радіус поперечного перерізу лазерного пучка у 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

$$q_H = \frac{kT_B}{2A} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}} \quad (1.13)$$

де a – коефіцієнт температуропровідності;

τ – тривалість лазерного імпульсу.

Тоді, 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 $q_B \approx 9 \cdot 10^5$ Вт/см².

Знаючи граничну щільність потужності випаровування оброблюваного матеріалу, можна визначити необхідний пороговий рівень потужності лазерного випромінювання. Для цього можна використовувати наступну формулу

$$P_{\text{пор}} = qS, \quad (1.14)$$

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

З урахуванням виконаних раніше розрахунків для безперервного лазера отримуємо

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

а для імпульсного лазера

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

2. Довжина хвилі і кутова розбіжність лазерного випромінювання. Для ефективного впливу довжина хвилі лазера повинна знаходитися в спектральній області, де оброблюваний матеріал має великий коефіцієнт поглинання.

Наприклад, для металів і ряду інших конструкційних матеріалів доцільно використовувати лазери, що генерують випромінювання у видимій області спектра, для обробки скла – лазери інфрачервоного (ІЧ) діапазону, а для полімерів – ультрафіолетові лазери. Крім того, потрібно мати на увазі, що довжина хвилі визначає також розміри зони впливу лазера d (діаметр світлової плями в місці фокусування лазерного пучка на оброблюваній поверхні). Ця величина може бути обчислена за формулою

$$d = 1,22 \frac{\lambda f}{D} M^2, \quad (1.15)$$

де f – фокусна відстань об'єктива;

D – діаметр вихідного (несфокусованого) лазерного пучка;

M^2 – коефіцієнт, що характеризує відмінність випромінювання технологічного лазера від ідеального гауссівського пучка з мінімально можливою дифракційною розбіжністю. Цей коефіцієнт називається M^2 -параметр.

З іншого боку, $M^2 \approx D\alpha$, 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 TEM_{00} .

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.

3. Загальна тривалість імпульсу. Чим менше тривалість імпульсу лазерного випромінювання, тим менший тепловий і деформаційний вплив воно має на оброблюваний матеріал поза зоною опромінення. Даний ефект визначається фізичними процесами, що відбуваються в матеріалі мішені при поглинанні лазерного випромінювання. 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

$$zt = \alpha \tau^{\frac{1}{2}}, \quad (1.16)$$

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

τ – тривалість лазерного імпульсу.

Температуропровідність металів змінюється в межах від 0,05 (для нержавіючих сталей) до 1,0 $\text{см}^2/\text{с}$ (для мідних сплавів).

Ефективність процесу випаровування (абляції) матеріалу істотно залежить від щільності потужності (енергії) лазерного імпульсу і носить пороговий характер. Граничне значення щільності енергії становить для алюмінію $\sim 0,2 \text{ Дж}/\text{см}^2$ (для імпульсів тривалістю менше 10 пс) і понад 1 $\text{Дж}/\text{см}^2$ – для імпульсів тривалістю 100 нс.

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

$$\tau = d_0 / v_{\text{скан}}, \quad (1.17)$$

де d_0 – фокальний розмір лазерної плями;

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

Отже, при роботі з безперервними лазерами якість обробки буде тим краще, чим менше розмір сфокусованого лазерного пучка і швидкість його сканування.

4. 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 $f_{\text{кр}} = a / (30r_0^2)$, то ці зміни спостерігатися не будуть і результат впливу лазера буде залежати тільки від енергії (потужності) окремих імпульсів. Наприклад, для сталі ($a = 3,45 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с}$) при $r_0 = 10 \text{ мкм}$ маємо

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

Частоту повторення імпульсів потрібно завжди вибирати більше $f_{\text{кр}}$, в даному конкретному випадку обробки сталі вона повинна бути не менше 100 Гц. У загальному випадку частота повторення імпульсів впливає на продуктивність роботи лазера – чим вище частота, тим вище швидкість обробки матеріалу.

2 ПОВЕРХНЕВЕ ЛАЗЕРНЕ ЗМІЦНЕННЯ

2.1 Обладнання для поверхневого зміцнення

Лазерне термічне зміцнення сталі полягає у впливі інтенсивного потоку лазерного випромінювання на локальну ділянку поверхні, швидкому розігріві цієї ділянки до високих температур (вище критичних) і охолодженні із швидкістю вище критичної. В процесі нагрівання і охолодження відбуваються фазові перетворення, що призводять до утворення мартенситу [5, 6]. З точки зору використання лазерного випромінювання для поверхневої обробки з метою зміцнення матеріалів представляють інтерес такі режими: лазерний нагрів поверхневого шару матеріалу до температури, що не перевищує температуру плавлення, витримка при цій температурі і подальше охолодження; нагрів матеріалу до температури, що перевищує температуру плавлення, кристалізація розплаву і охолодження закристалізованого матеріалу; нагрів матеріалу до температури, що перевищує температуру його випаровування, та пластична деформація за рахунок ударної хвилі; нагрів поверхневого шару плазмою, що утворюється при взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом.

Ці режими лазерного нагріву і фізичні явища в матеріалі, що їх супроводжують, лежать в основі методів поверхневого зміцнення.

В даний час з різною технологічною метою використовуються три типи лазерів: це газові, твердотільні і волоконні. Газові CO₂-лазери потужністю понад 1 кВт, надійні в експлуатації, з автоматизованою системою управління технологічного комплексу широко застосовуються для різних технологічних операцій, в тому числі для термічної обробки (рис. 2.1) [7].

Однак висока вартість таких комплексів та їх низька продуктивність обмежують застосування таких лазерів. Твердотільні лазери на алюмоітрієвому гранаті (Nd³⁺:YAG-лазери) мають в порівнянні з газовими ряд переваг (рис. 2.2). Вони більш компактні, мають більш високі значення коефіцієнта корисної дії. Одночасно з цим YAG-

лазери мають високу вартість і потребують значних експлуатаційних витрат. Для термічної обробки використовуються YAG-лазери потужністю 1...5 кВт, що працюють як в безперервному, так і в імпульсному режимі.



Рис. 2.1. Комплекс на базі CO₂-лазера для поверхневого зміцнення



Рис. 2.2. Твердотільний лазер L-Master DP

На сьогоднішній день найбільш перспективними технологічними інструментами є волоконні лазери, які мають високу ефективність (до 50 %), що зменшує експлуатаційні витрати; невеликі розміри дозволяють легко вбудовувати їх в існуючі системи виробництва (рис. 2.3). Однак їх вартість поки залишається досить високою, що також не дозволяє говорити про їх широке використання.



Рис. 2.3. Ітербієвий імпульсний волоконний лазер для металу ЛК-700

Незважаючи на існуючу думку про те, що для проведення термічної обробки необхідний безперервний режим, можна припустити, що використання імпульсного випромінювання дозволить знизити потужність лазерних пристроїв: мала тривалість імпульсів і можливість фокусування випромінювання в пляму малого діаметра дозволяють створювати щільності потужності, які достатні для нагрівання оброблюваної поверхні до температур вище фазових перетворень.

2.2 Визначення мікротвердості

Для вимірювання мікротвердості використовували мікротвердомір ПМТ-3. Дослідження мікротвердості проводилися за загальноприйнятою методикою за ГОСТ 9450-76. Мікротвердість вимірювали з навантаженням 50 г. Вимірювання мікротвердості проводили за допомогою комплексу, що був розроблений на кафедрі ХНАДУ

ТМтаМ, з високою точністю на базі мікротвердоміра ПМТ-3 і персонального комп'ютера (рис. 2.4) [8].

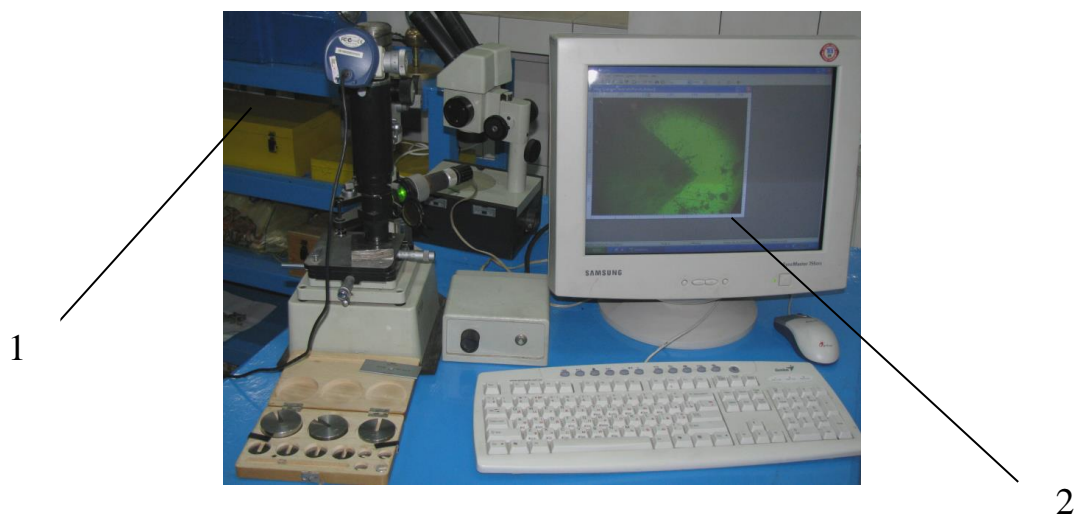


Рис. 2.4. Дослідницький комплекс: 1 – модернізований мікротвердомір з відеокамерою; 2 – зображення відбитка

Значення довжини діагоналей заносяться автоматично в таблицю в програмі Excel і проводиться розрахунок середнього значення мікротвердості (рис. 2.5).

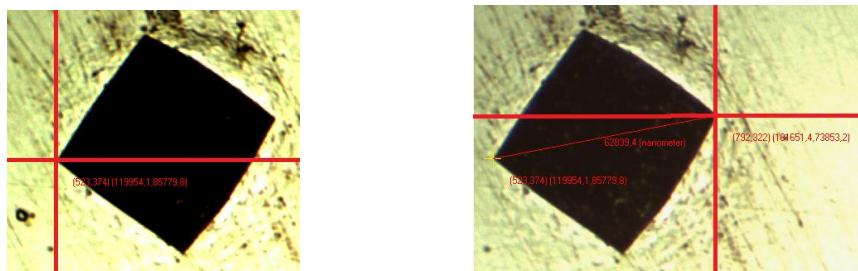


Рис. 2.5. Вимірювання діагоналі відбитка: а – фіксування координат лівої вершини відбитка; б – фіксування координат правої вершини відбитка і довжини діагоналі

Вимірювання мікротвердості проводили втискуванням чотиригранної алмазної піраміди. Зображення відбитка передається за допомогою відеокамери на екран монітора 2. На екрані зображення може бути збільшене до будь-яких розмірів. Тобто самий маленький

відбиток може бути збільшений до розмірів, які дозволяють його вимірювати з найвищою точністю. Потім зображення відбитка обробляється за допомогою програми Scope Photo – вимірюється довжина діагоналі відбитка (рис. 2.5).

Запропонована методика вимірювання довжини діагоналі відбитка, удосконалена за допомогою сучасних комп'ютерних технологій, менш трудомістка, більш продуктивна, менше ймовірність внесення погрешностей, пов'язаних з людським фактором.

2.3 Зміцнення одноімпульсною лазерною обробкою

На сталях із різним вмістом вуглецю в різному стані (в покращеному – режим 1 і нормалізованому – режим 2) досліджували вплив імпульсного випромінювання лазера малої потужності (твердотільний YAG-лазер потужністю 5 Вт з діодним накачуванням, довжина хвилі випромінювання $\lambda=1,064$ мкм, що працює в імпульсному режимі) (рис. 2.6) [9-13].

Аналіз отриманих результатів показує, що попередня термічна обробка (вихідна структура) суттєво впливає на властивості поверхневих шарів після лазерного гартування. Покращення (режим 1) формує структуру сорбіт відпуску із сфероїдизованими карбідами, що рівномірно розподілені в матриці з фериту. Структура сталей 20 і 45 після нормалізації ферито-перлітна (пластинчасті карбіди), сталі У12 – перліт і цементит. Подальше лазерне гартування в імпульсному режимі призводить до утворення структур гартування. Структура сталі У12 після одноімпульсного лазерного гартування – дрібноногочастий мартенсит з деякою кількістю дрібнодисперсного цементиту (рис. 2.6).

Для кожної сталі існує певне значення тривалості імпульсу, що дозволяє отримати максимальну твердість (рис. 2.7, б).

Дослідження показали, що відсутня залежність між вмістом вуглецю в сталі і оптимальною тривалістю імпульсу при лазерному гартуванні (рис. 2.7, б).

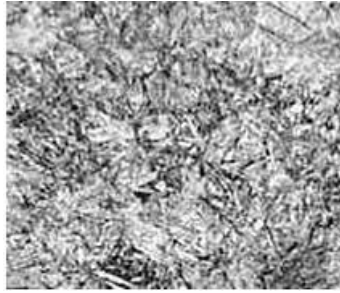


Рис. 2.6. Мікроструктура сталі У12 після одноімпульсного лазерного гартування (довжина імпульсу 0,2 мс), $\times 1000$

Мікротвердість зміцнених лазерним гартуванням поверхневих шарів нормалізованої сталі 45 (рис. 2.6, б) значно вище, ніж покращеної (рис. 2.6, а), яка має більш дисперсну структуру сорбіт відпуску.

Зі збільшенням кількості вуглецю мікротвердість зміцненого шару зростає.

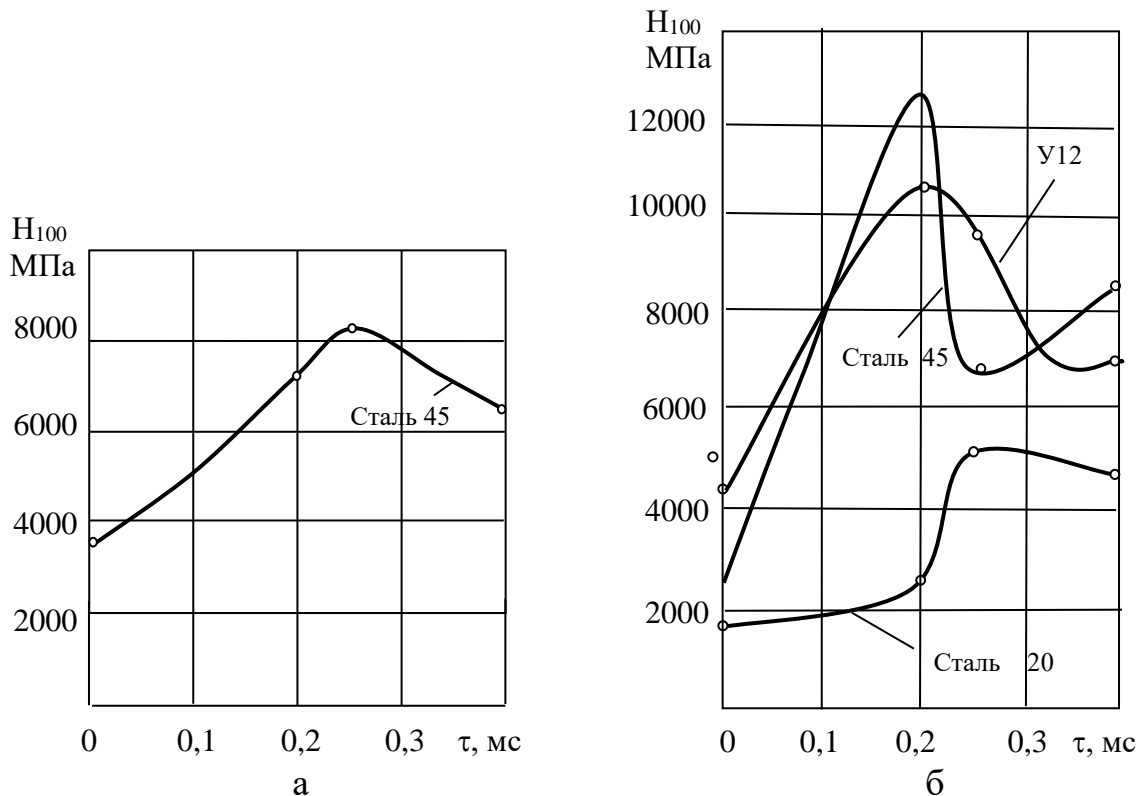


Рис. 2.7. Залежність мікротвердості вуглецевих сталей від тривалості імпульсу: а – режим 1; б – режим 2

Ці результати не узгоджуються з результатами, отриманими в роботі [14], де максимальна твердість отримана на зразках з більш дисперсною вихідною структурою (тростит). Ймовірно, пояснення криється в умовах обробки, зокрема в короткочасності температурного впливу [15]. Твердотільний лазер малої потужності дозволяє отримувати імпульси дуже малої тривалості з великою щільністю енергії. Розміри області опромінення дуже малі, тому відбувається надшвидкісне охолодження металу. Можна припустити, що в таких умовах процеси, пов'язані з аустенізацією і розплавленням сталі, розчиненням карбідів, затвердінням і подальшим $\gamma \rightarrow \alpha$ -перетворенням, не встигають завершитися в повному обсязі, що і призводить до суперечливих результатів, які не узгоджуються з отриманими при обробці більш потужними імпульсними лазерами і лазерами безперервної дії.

Порівняння отриманих значень мікротвердості контрольних зразків (об'ємне гартування) показує, що лазерне зміцнення дає більш високі значення, причому максимальний приріст мікротвердості досягається на низьковуглецевій сталі 20 (табл. 2.1) [9].

Таблиця 2.1 – Вплив лазерної обробки на мікротвердість сталей різних марок в порівнянні з об'ємним гартуванням

Приріст мікротвердості після лазерного гартування в порівнянні з об'ємним, %	Марка сталі	
	Сталь 20	Сталь 45
Режим 1	275	76
Режим 2	275	14

Таким чином, на основі проведених досліджень можна зробити висновок про можливість поверхневого зміцнення сталей малопотужними лазерами при використанні імпульсного режиму [16]. Однак продуктивність такого процесу низька, що не дозволяє зміцнювати поверхні деталей великої площини.

2.4 Зміцнення багатоімпульсною лазерною обробкою

Подальші дослідження включали обробку одиночними імпульсами тривалістю 0,1...0,4 мс і багатоімпульсну обробку короткими (30...70 мкс) імпульсами. Дослідження проводили на відпаленій сталі 20 з ферито-перлітною структурою, поверхня якої опромінювалася імпульсами з різною щільністю енергії (до 150 Дж/см²). Металографічні дослідження показали, що при опроміненні імпульсами з щільністю енергії менше 130 Дж/см², структурних змін не відбувається. З підвищенням щільності енергії до 150 Дж/см² структура сталі змінюється. Вона складається з мартенситу і α -фази, що пройшла $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ -перекристалізацію. До помітних структурних змін призводить і зміна кількості імпульсів випромінювання. Після впливу двох імпульсів при щільності енергії 150 Дж/см² в α -фазі відбувається подрібнення зерен. Дуже суттєво змінюється мікроструктура під впливом п'яти імпульсів – при достатній кількості імпульсів відбувається гомогенізація аустеніту, в результаті чого при охолодженні утворюється однорідна структура дрібногочастого мартенситу.

Дослідження проводили також на інструментальних сталях: вуглецевій У12 і швидкорізальній Р6М5 [17]. У табл. 2.2 наведені результати розрахунків щільності потужності в залежності від тривалості імпульсу для багатоімпульсної обробки.

Зі збільшенням тривалості імпульсу значення щільності потужності зростають. Ці дані добре узгоджуються з аналізом поверхні зміцнених зразків. Всі досліджені режими викликають нагрів оброблюваної поверхні вище температури розплавлення.

Однак при обробці одиночними імпульсами спостерігається не тільки плавлення, а й спінення металу, а після кристалізації на поверхні утворюються мікротріщини (рис. 2.8).

Таблиця 2.2 – Розрахунок щільності потужності для багатоімпульсної обробки

Режим	Тривалість імпульсу, мкс	40	50	60	70	400
	Енергія в імпульсі, Дж	0,7	1,45	2,38	3,55	0,25
Щільність потужності q , Вт/м ²		$7,3 \cdot 10^8$	$12,1 \cdot 10^8$	$16,5 \cdot 10^8$	$21,1 \cdot 10^8$	$8,8 \cdot 10^9$

Використання багатоімпульсної обробки хоча і призводить до часткового оплавлення, що в ряді випадків не бажано, все ж забезпечує більш високу якість поверхні.

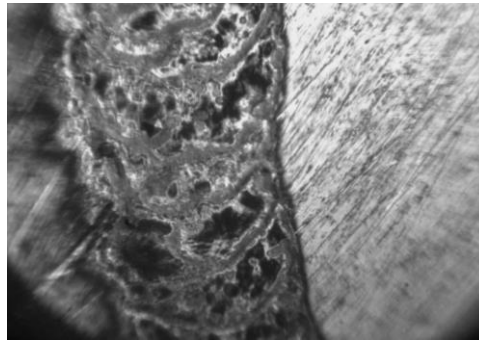


Рис. 2.8. Сталь У12, тривалість імпульсу 0,4 мс

Аналіз досліджень мікротвердості зразків, які зміцнені за двома режимами, показав, що при обробці серіями коротких імпульсів мікротвердість сталі У12 вище, ніж при обробці одиночними імпульсами (рис. 2.9).

Можна припустити, що при багатоімпульсній обробці внаслідок малого часу впливу лазерного випромінювання на матеріал і великій швидкості відводу тепла, дифузійні процеси, пов'язані з розчиненням карбідів при плавленні, не встигають завершитися в повному обсязі.

Тому вторинний цементит зберігається, відбувається подальше подрібнення зерна, підвищення щільності дислокацій, що призво-

дить до зростання рівня внутрішніх напружень, і, як наслідок – підвищення твердості.

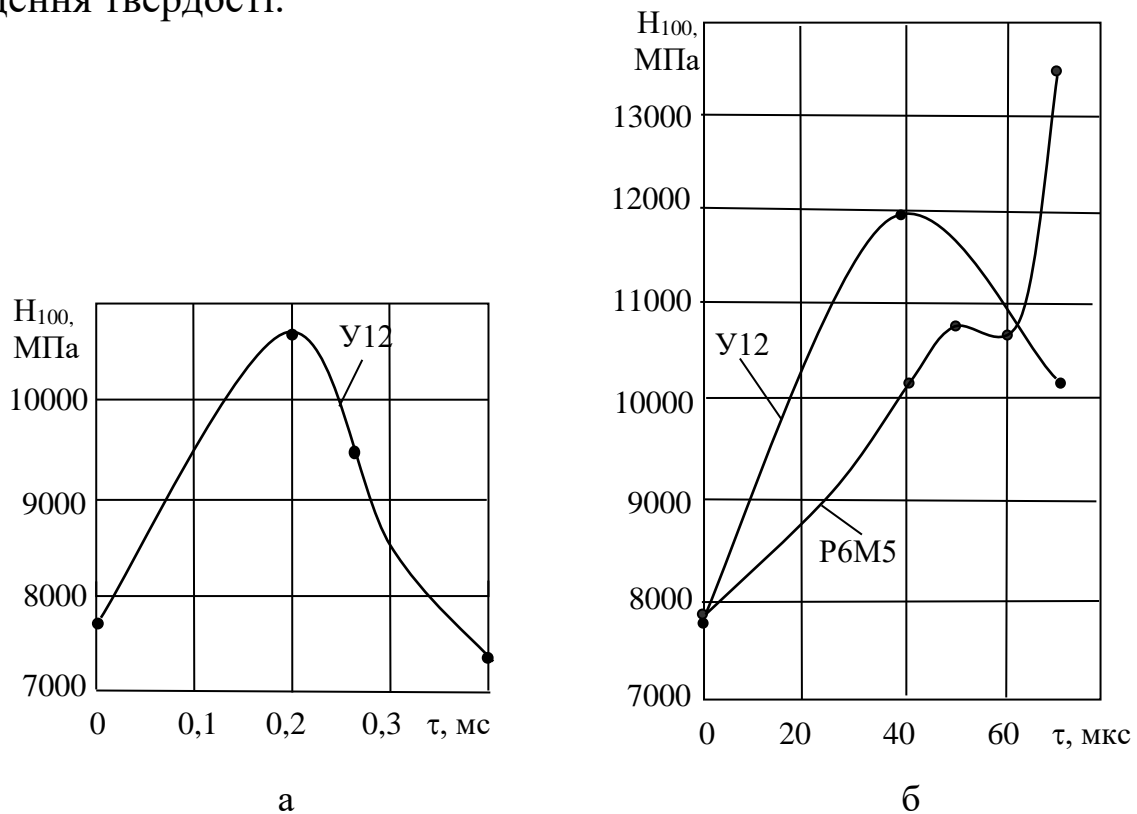


Рис. 2.9. Залежність мікротвердості від тривалості імпульсу: а – обробка одиночними імпульсами, б – багатоімпульсна обробка

Для сталі У12 оптимальне значення тривалості імпульсу становить 40 мкс. Для сталі Р6М5 в розглянутому часовому інтервалі спостерігається майже монотонне зростання мікротвердості [17]. Можна припустити, по-перше, що проведення досліджень з більшою тривалістю імпульсу дозволить розробити оптимальний режим лазерного зміцнення для сталі Р6М5.

По-друге, збільшення оптимальної тривалості імпульсу для сталі Р6М5 в порівнянні зі сталлю У12 пов'язане з її особливими теплофізичними властивостями: більш високою теплоємністю і більш низьким в порівнянні з вуглецевою сталлю коефіцієнтом теплопровідності.

Таким чином, використання твердотільного лазера з довжиною випромінювання $\lambda = 1,06$ мкм дозволяє проводити гартування, але

температура нагрівання поверхні інструментальних сталей все ж за- висока – більша за температуру плавлення. Після лазерного впливу шорсткість поверхні вище, ніж до обробки. Незважаючи на значне зміцнення, така обробка не може бути запропонована для відповіда- льних деталей з високою якістю поверхні.

Гартування малопотужними лазерами дозволяє проводити те- рмічне зміцнення сталей і отримати високі значення мікротвердості поверхневого шару [18]. Збільшення щільності потужності при про- веденні поверхневого зміцнення досягали за рахунок зменшення ді- аметра плями фокусування лазерного проміню та збільшення кіль- кості імпульсів. Однак і при одноімпульсній і при багатоімпульсній обробці гартування супроводжується частковим оплавленням.

Відомо, що із зменшенням довжини хвилі зростає поглинальна здатність металів, тому перспективним є гартування сталей за до- помогою короткохвильового УФ-випромінювання, яке дозволяє отримувати якісну поверхню. Дослідження зразків, оброблених в імпульсному режимі при середній потужності 5 Вт і швидкості ска- нування 25 мм/с, показало, що оплавлення поверхні не відбувалось. Результати вимірювань мікротвердості наведені у табл. 2.3.

Аналіз результатів вимірювання мікротвердості показав мож- ливість поверхневого зміцнення сталей із збереженням необхідної якості поверхні малопотужними лазерами УФ-діапазону при вико- ристанні імпульсного режиму. Таким чином показано, що для пове- рхневого зміцнення можливе використання лазерів малої потужнос- ті в імпульсному режимі. Для сталей з різним вмістом вуглецю при лазерному гартуванні визначені оптимальні величини тривалості імпульсів. Встановлено, що більше зміцнення має місце при обробці сталі із структурою пластинчастого перліту.

Дослідження показали, що лазерне гартування дає більш висо- кі значення мікротвердості, ніж об'ємне, причому максимальний приріст мікротвердості досягається на низьковуглецевій сталі 20 [19, 20].

Таблиця 2.3 – Мікротвердість різних сталей до та після гартування

Марка сталі	Мікротвердість, МПа		
	У вихідному стані	Гартування ГЧ-випромінюванням, $\lambda = 1,06$ мкм	Гартування УФ-випромінюванням, $\lambda = 0,355$ мкм
20	2100	5770	6350
45	2700	8050	9200
У12	8150	11050	11280
ШХ15	7950	10200	10150

При багатоімпульсній обробці сталей, коли довжина імпульсу менше, ніж при одноімпульсній, інтенсивність зміцнення вище, а якість обробленої поверхні краще. Однак рекомендувати таку обробку можна тільки для тих виробів, де не потрібна висока якість поверхні.

Одноімпульсна і багатоімпульсна обробка супроводжуються частковим оплавленням поверхні сталевих виробів. 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.

3 ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОГО МАРКУВАННЯ МАТЕРІАЛІВ

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.

В статті 15 Закону України «Про захист прав споживачів» сказано: «Споживач має право на одержання необхідної, доступної, достовірної та своєчасної інформації про продукцію, що забезпечує можливість її свідомого і компетентного вибору. Інформація повинна бути надана споживачеві до придбання ним товару чи замовлення роботи (послуги)».

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 краплеструмене. 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.

Штампірування і нанесення клейма. Такі способи маркування використовують найчастіше в харчовій промисловості. Клеймо чор-

нилом зазвичай наносять на м'ясну продукцію, а також на шкаралупу пташиних яєць. Штампірування 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 високоінтенсивного 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, гравірування з оплавленням (рис. 3.1).

При гравіруванні під дією сфокусованого випромінювання видаляється частина матеріалу – до 100 мкм при звичайному марку-

ванні, до 0,5 мм при художньому гравіруванні або 3,5 мм при глибокому гравіруванні.

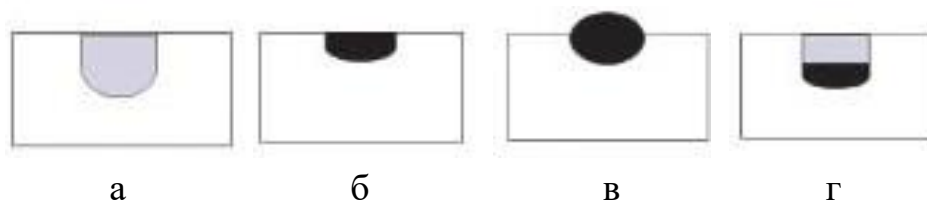


Рис. 3.1. Типи впливу лазерного випромінювання на поверхню оброблюваного матеріалу: а – гравірування поверхні видаленням матеріалу, б – поверхневий контраст, в – оплавлення поверхні, г – гравірування з оплавленням

Маркування стає добре видимим, оскільки падаюче світло розсіюється в каналах поруч з немаркованим матеріалом. Технологія отримала широке застосування у всіх галузях виробництва. У мікроелектроніці воно застосовується для маркування заготовок, виробів і оснащення на всіх стадіях розробки і виробництва, наприклад, для кремнієвих пластин [1]. Гравірування найчастіше наносять на метал (зазвичай на вироби з вуглецевої і нержавіючої сталі), кераміку, оргскло і акрил.

Поверхневий кольоровий контраст в неметалевих матеріалах виникає при фотохімічному впливі на поверхню матеріалу, що маркується. Цей вид маркування застосовується в основному для неметалів, які знебарвлюються під дією УФ-випромінювання.

3.2 Лазерне кольорове маркування

В основі кольорового маркування металів лежить процес утворення на поверхні зразка плівок з оксидів і нітридів оброблюваного матеріалу під впливом лазерного випромінювання. Кольори мінливості – веселкові кольори, які утворюються на гладкій поверхні металу або мінералу в результаті утворення тонкої прозорої поверхневої окисної плівки (яку називають мінливістю) і інтерференції світ-

ла в ній. Оксидні плівки формуються при лазерній обробці на відкритому повітрі. Для отримання нітридних плівок метали обробляють у спеціальній камері з піддувом азоту. В обох випадках колір плівки залежить від її хімічного складу і товщини. На практиці частіше створюють оксидні плівки, так як це не вимагає спеціального технологічного оснащення для азотування.

Оксидні плівки формуються в результаті однорідного нагрівання поверхні металу, що стимулює процес його окислення. Такий метод широко застосовується ще з давніх часів в металургії для художньої та промислової обробки металевих виробів.

Однак лазерна технологія отримання кольорових оксидних плівок має ряд значних переваг, в тому числі швидкість, локальність впливу і високу точність обробки. Це досягається завдяки малому (десятки мікрметрів) діаметру лазерного променя і застосуванню високоточних швидкісних систем сканування.

Поява кольорів мінливості обумовлена інтерференцією світла, яка виникає в результаті складання хвиль, що відбиваються від поверхневого шару оксидної плівки і поверхні самого металу. При цьому в міру зростання товщини оксиду послідовно виникають умови гасіння променів з тією чи іншою довжиною хвилі, в результаті чого колір плівки може змінюватися від фіолетового до червоного. Однак на колір плівки впливає також і ступінь шорсткості поверхні металу.

Для різних матеріалів утворення окисних плівок відбувається по різному. На швидкість утворення окисних плівок значний вплив мають:

- 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 плавленням матеріал досягає температури плавлення і через хімічні реакції, ефекти окислення або зміни в поверхневій морфології виникає видиме маркування. Цей метод не часто застосовується при маркуванні металевих поверхонь через низький контраст.

Гравірування поверхні з оплавленням – комбінація видалення матеріалу з оплавленням, яке зосереджується в основі гравірованого каналу.

При проведенні досліджень в якості змінних параметрів було обрано довжину хвилі випромінювання, яка визначається типом лазера, потужністю випромінювання та тривалістю лазерного впливу, що залежить від тривалості імпульсів, частоти їх проходження та швидкості переміщення лазерного випромінювання по поверхні оброблюваного матеріалу.

В даний час в технологічних цілях (для маркування) можна використовувати всі типи лазерів: газові, твердотільні і волоконні. Тому дослідження проводились на установках: 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 ітербієвого волоконного лазера ($\lambda = 1,03$ мкм, середня потужність до 20 Вт).

Лазерне кольорове маркування можна створити на металі, здатному до окиснення, тобто 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 окиснення.

Якісне і стійке кольорове маркування можна одержати лише на металах, які пасивуються, тобто на таких, що мають свою щільну оксидну плівку, наприклад, на нержавіючій сталі, алюмінії, титані та їх сплавах. Дослідження проводилися на корозійно-стійкій

сталі марки 12Х18Н10Т після електрополірування (стан поставки) [23, 24]. Сталь 12Х18Н10Т – нержавіюча титановмісна сталь аустенітного класу. Хімічний склад цієї сталі регламентований ГОСТ 5632-72.

При нагріванні матеріалу до певних температур на його поверхні утворюються оксидні шари різної товщини. Залежно від товщини шару виникають умови поглинання променів з тією чи іншою довжиною хвилі. Внаслідок цього можна спостерігати кольори мінливості на поверхні металу. Залежно від температури нагрівання матеріалу змінюються і параметри оксидних шарів, отже, змінюється і колір поверхні.

Для теоретичного розрахунку параметрів лазерного випромінювання необхідно знати залежність кольору від температури нагріву поверхні. Для цього був проведений експеримент, в ході якого зразки з корозійностійкої сталі нагрівалися в лабораторній термічній печі СНОЛ/11 при температурах від 300 до 700 °С з інтервалом 50 °С. Після фотографування зразків була складена шкала залежності кольору від температури (рис. 3.2).

Для подальших досліджень було обрано температури 400, 500, 600 і 650 °С, тому що при цих температура отримані більш насичені кольори.

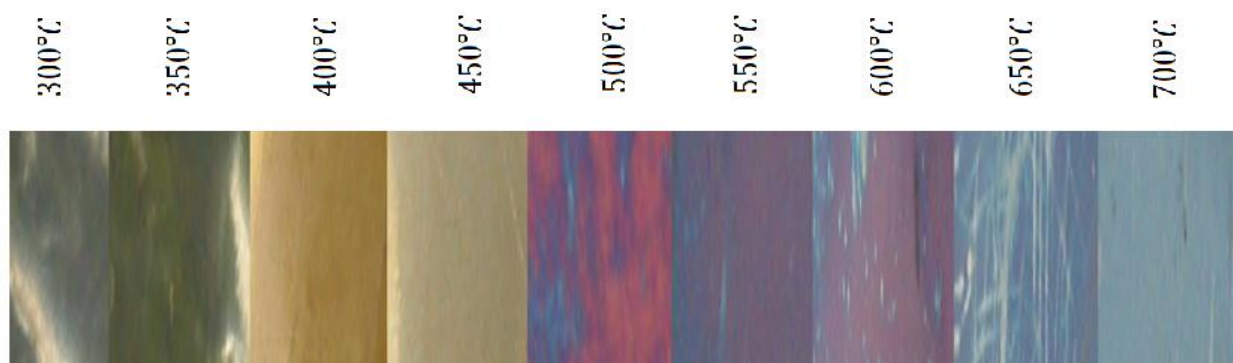


Рис. 3.2. Шкала залежності кольору від температури

Далі проводився підбір параметрів лазерного випромінювання таким чином, щоб поверхня матеріалу нагрівалася саме цими температурами, так як зміни навіть на 20°C змінюють колір. Попередній розрахунок температурно-часових параметрів випромінювання проводився за рекомендаціями [25].

Згідно із розрахунками, для досягнення поставленої мети потужність випромінювання повинна бути 16,5 – 20 Вт у безперервному режимі. Провести точний розрахунок потужності та тривалості впливу неможливо, так як формули не враховують товщину матеріалу, зміну поглинальної здатності матеріалу в процесі обробки, можливість обробки у декілька проходів. Тому точний підбір параметрів лазерного випромінювання проводився експериментальним шляхом.

Дослідження показали, що використання CO₂-лазера недоцільно не тільки для створення кольорового маркування, а й для гравірування. Оброблені ділянки мали вигляд гравірування з оплавленням і обвуглюванням. Слід зазначити, що випромінювання CO₂-лазерів набагато важче піддається тимчасовому і просторовому перетворенню, ніж випромінювання твердотільних лазерів [25]. Це значно ускладнює застосування CO₂-лазерів в імпульсному режимі для лазерного маркування.

В результаті експериментів із застосуванням Nd:YAG-лазера було отримано поєднання гравірування з частковим кольоровим контрастом. Жоден з досліджених режимів не дозволив отримати повнокольорове маркування – на всіх зразках оксидні плівки були сіро-чорного кольору різної насиченості, іноді із блакитним відтінком, оброблена поверхня мала явно виражений рельєф. 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.

Встановлено, що зменшення частоти робить рельєф поверхні грубішим, а зображення стає більш темним. В цілому ці зміни незначні і не дозволяють сподіватися на створення кольорового зображення.

На рис. 3.4 представлений вплив швидкості обробки при частоті проходження імпульсів 12 кГц (рядок 1), 18 кГц (2) та 20 кГц (3). В кожному рядку швидкість обробки зростала від 10 до 60 мм/с. Як видно, швидкість сканування також незначно впливає на результат обробки.

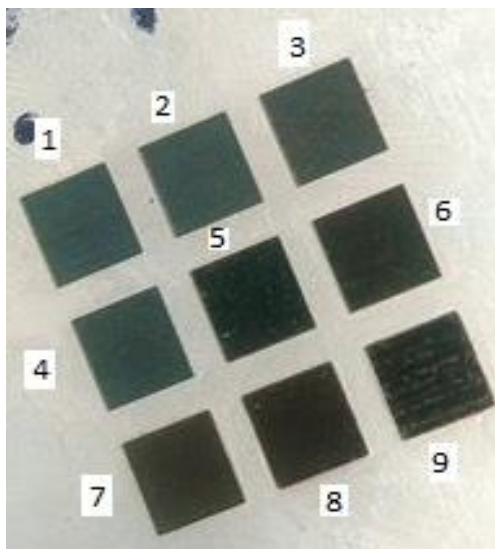


Рис. 3.3. Вплив частоти проходження імпульсів на колір та рельєф поверхні

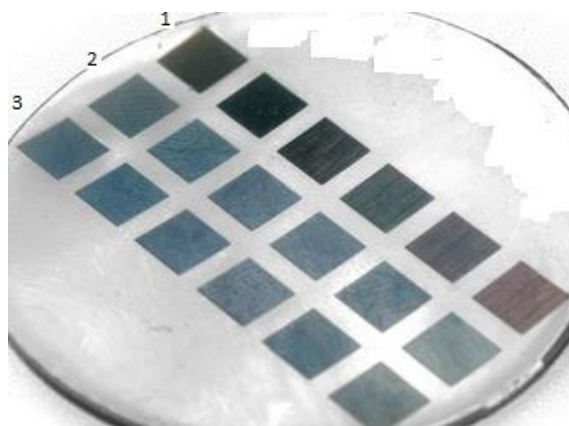


Рис. 3.4. Вплив швидкості сканування на колір та рельєф поверхні

Після фотографування зразків був отриманий код кольору в графічному редакторі CorelDRAW. В подальшому може бути розроблена таблиця залежності коду кольору від параметрів випромінювання, після чого дане маркування можна використовувати як у виробництві (штрих-коди, серійні номери та ін.), так і для декоративної продукції (створення різних монохроматичних орнаментів і рисунків).

Порівняння рельєфу зразків, оброблених за різними режимами (рис. 3.5), свідчить, що зміна параметрів в досліджених межах не дозволяє одержати кольорове зображення за допомогою гравірувальної установки на базі Nd:YAG-лазеру.

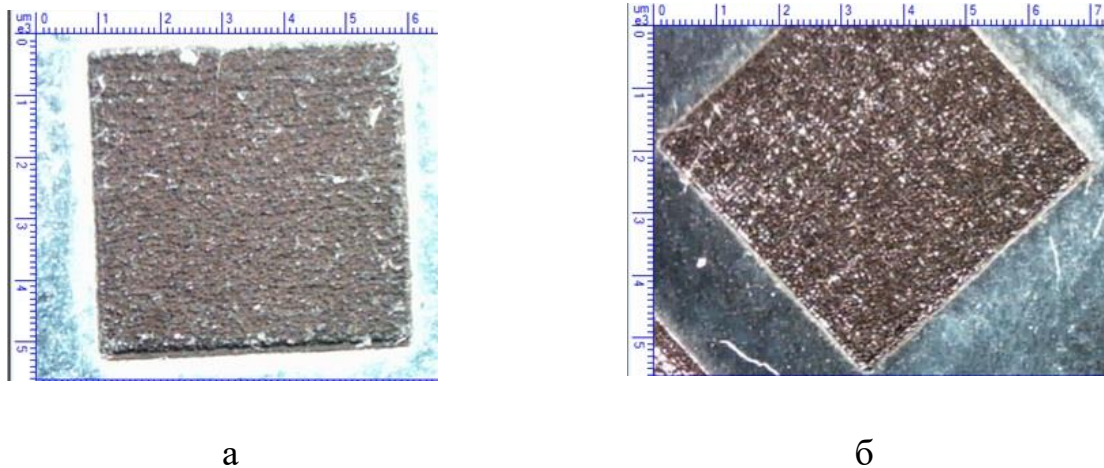


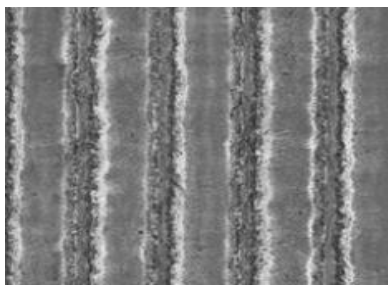
Рис. 3.5. Рельєф поверхні при різних режимах обробки: а – частота проходження імпульсів 4 кГц, швидкість обробки 5 мм/с, б – частота проходження імпульсів 12 кГц, швидкість обробки 20 мм/с

Водночас результати цих досліджень можуть бути використані при гравіруванні монохромних зображень.

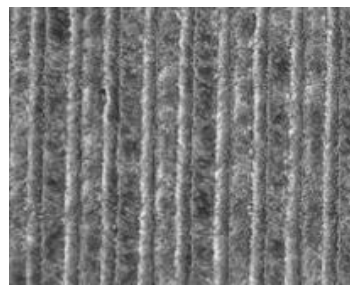
Отримати кольорове маркування вдалося тільки за допомогою волоконного лазера (рис. 3.6).

Особливості конструкції установки МініМаркер2 на основі ітербієвого волоконного лазера дозволяли проводити обробку при постійних параметрах (потужність 20 Вт, частота проходження ім-

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 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 шар формується за рахунок акумуляції енергії сусідніх ліній. Оригінального матеріалу між лініями в цьому випадку не залишається, тому колір обробленої поверхні має більшу однорідність, ніж при скануванні з роздільною здатністю 20 ліній/мм. Однак при використанні даного методу крайні лінії в сформованому таким чином зображенні відрізняються за кольором від інших, так як кількість одержуваної ними енергії відмінна від кількості енергії, що припадає на решту площі обробленої лазером поверхні.

Таким чином, дослідження показали, що використання CO₂-лазера недоцільно не тільки для створення кольорового маркування, а й для гравірування.

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

Повнокольорове лазерне маркування може бути одержане тільки за допомогою волоконного лазера. Колір маркування визначається в основному кількістю імпульсів в точку.

3.3 Маркування полімерів

Маркування полімерів енергією випромінювання було вперше згадане в 1956 – за 4 роки до винаходу лазера. Лазери можуть створювати позначки на полімерах за допомогою одного з чотирьох процесів: зміни кольору, піноутворення при плавленні, гравірування або гравіювання зі зміною кольору.

Лазерне маркування можна наносити майже на всі класи комерційних пластичних полімерів. Однак для того, щоб нанести маркування на деякі з них, необхідно використовувати добавки. Залежно від того, які використовуються матеріали і добавки, позначки 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. Такими відмітками можуть бути білий, чорний або різні відтінки фонових кольорів. Крім цього, відмітки можуть мати різні кольори на білому, чорному або сірому фоні.

На рис. 3.8 зображені: кнопка клавіатури, темне маркування на світлому фоні (ліворуч); логотип компанії, 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.



Рис. 3.8. Приклади маркування пластмас

Найвища потужність і низька частота швидко підвищують температуру поверхні, випаровуючи матеріал з одночасною передачею мінімальної кількості тепла в підкладку. Вид поверхні полімеру після такого маркування представлений на рис. 3.9.

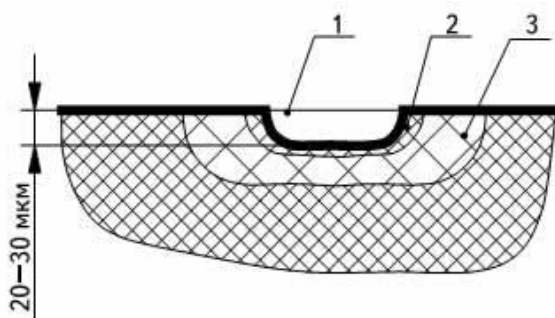


Рис 3.9. Поверхневий шар деталі після маркування, заснованому на термічному ефекті: 1 – канавка, одержувана в результаті нагріву, плавлення і випаровування матеріалу, 2 – зона обвуглення матеріалу, 3 – зона матеріалу з частково зміненою структурою

При підвищенні частоти повторення імпульсів знижена пікова потужність сприяє мінімальному випарюванню, але проводить більше тепла. Критично важливим фактором також є швидкість сканування.

Для маркування органічних матеріалів 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 висо-

ких 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.

Твердотільні Nd:YAG-лазери в порівнянні з CO₂-лазерами є більш гнучкими, що дозволяє користувачам легко змінювати форми і шрифти. Ці лазери можуть вести більш точне маркування, ніж CO₂-лазери. Вони використовуються в тих випадках, коли потрібні високоякісні позначки, наприклад на електронних з'єднаннях або хірургічному устаткуванні.

Цікавим прикладом є нанесення Nd:YAG-лазером рекламних маркувань на внутрішню поверхню кришок для пляшок з напоями, що не мають внутрішнього облицювання і містять поліолефінові матеріали, оптимізовані для лазера. Маркування проводиться в імпульсному режимі.

Маркування може здійснюватися не тільки випаровуванням матеріалу, а й знебарвленням під дією ультрафіолетового випромінювання (рис. 3.10). У цьому випадку використовується третя гармоніка лазерного випромінювання.

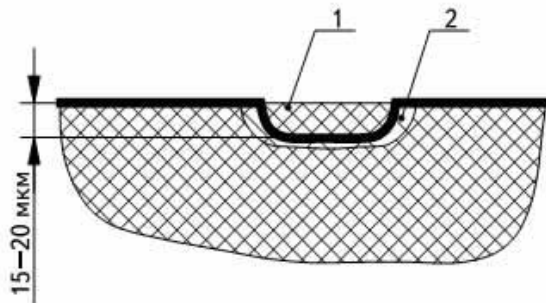


Рис. 3.10. Поверхневий шар деталі після ультрафіолетового лазерного маркування: 1 – зона матеріалу зі зміненним кольором, 2 – зона з незначними структурними змінами

Інтенсивне ультрафіолетове випромінювання знебарвлює практично всі сучасні полімерні матеріали – під дією лазерного променя формується біле маркування на темному полі. Полімери, пофарбовані в білий колір (основний пігмент TiO₂), набувають мар-

кування сріблясто-сірого кольору за рахунок відновлення іонів титану.

3.4 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 завдає шкоди навколишньому середовищу. Перевагами безпосереднього маркування в порівнянні з традиційними способами є гігієнічність, не токсичність, швидкість маркування і відсутність великих витрат.

Зображення на поверхні продуктів харчування може формуватися або створенням поверхневого контрасту, або шляхом випаровування ділянок поверхні, тобто гравіруванням. В даний час застосовуються обидва ці способи [27].

Вперше пряме лазерне маркування продуктів харчування використовувалося для створення інформації на фруктах з товстою шкіркою – апельсинах, лимонах, бананах. Ця технологія передбачала нанесення на поверхню плодів хімічних реактивів, що змінюють колір під дією лазерного випромінювання. Лазерний промінь не проникає в шкірку, він тільки позбавляє пігментації його верхній шар. Для підвищення контрастності застосовують спеціальну рідину, на яку було отримано міжнародний патент. Рідина розпорошується на фрукт відразу після маркування лазером (рис. 3.11).

Іспанська компанія Laser Food 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. В ЄС 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 на фруктах, з цього моменту маркування використовується повсюди.



Рис. 3.11. Лазерне маркування апельсинів

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

Хімічні речовини використовуються в невеликих кількостях і тільки на зовнішній частині фруктів без значного потрапляння в середину. Оксиди заліза і гідроксиди, які відомі як E172, є натуральними мінералами, виготовленими із залізного порошку, який може бути жовтого, червоного, оранжевого, коричневого або чорного кольору. E172 можна знайти в тортах і десертах, м'ясному пюре, лососі і закусках з креветок. 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 та ін.

Система лазерного маркування залишає на шкурці фрукта або овочу інформацію, яку неможливо видалити або корегувати. Фахівці Laser Food заявляють, що така технологія більш економічна за інші види маркування, так як виключає використання витратних матеріалів, таких як фарба, клей, папір [29, 30].

Аналогічна система розроблена і в США. Маркування наноситься за допомогою CO₂-лазера, для підвищення контрасту використовуються пігменти на основі оксидів і гідроксидів заліза. Пігмент проникає тільки у верхні клітинні шари шкірки, поверхня продукту практично не руйнується. Так зване татуювання (рис. 3.12) не веде до втрати вологи і не викликає проникнення патогенних організмів.

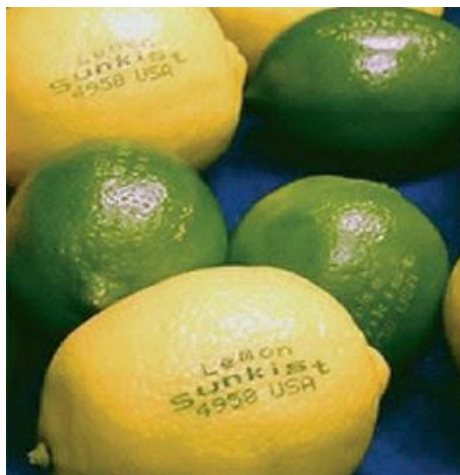


Рис. 3.12. Лазерне маркування цитрусових

У лабораторіях Управління з контролю якості харчових продуктів і лікарських препаратів США (FDA) проведено безліч тестів на безпеку застосування лазерного маркування. Вчені з Університету Флориди довели, що обробка поверхні плода лазером не призводить до втрати вологи і проникнення хвороботворних інфекцій. FDA схвалило використання інфрачервоного лазера для маркування цитрусових [31].

У Китаї розроблено цікавий спосіб маркування фруктів, 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. Випромінювання змінює колір пігменту в шкірці, не порушуючи її цілісності.

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



Рис. 3.13. Лазерне маркування яблук

Лазерний промінь проникає на два-три клітинних шари. Шкірка помідора, наприклад, має близько ста шарів, тому такий метод маркування теж можна використовувати для фруктів і овочів (рис. 3.14) [29].

Система вже випробувана і функціонує в Новій Зеландії та Австралії, і компанія-виробник планує впровадити її по всьому світу.

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.

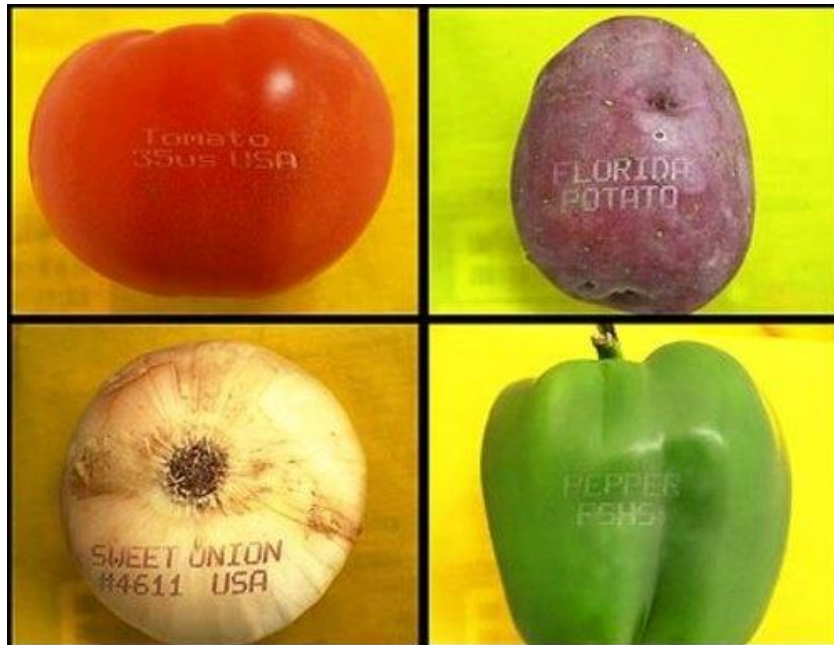


Рис. 3.14. Лазерне гравірування овочів

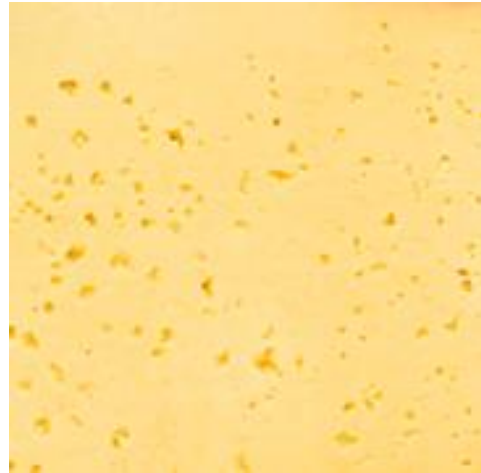
Для того, щоб визначити який лазер підходить для маркування сиру, проводився ряд експериментів з підбору довжини хвилі випромінювання.

Метою експериментів є дослідження можливості отримання видимого зображення на поверхні сиру за допомогою трьох типів лазерів. Для проведення експерименту використовувалися: CO₂-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. Маркуванню піддавали сири та сирні продукти українського виробництва середньої цінової категорії [32]. Результати представлені на рис. 3.15.

Найкращий результат був отриманий на установці з CO₂-лазером з режимом: $P = 80$ Вт, $\nu = 500$ Гц, $V = 0,2$ м/с. Випромінювання цього лазера, яке знаходиться в інфрачервоній частині спектра, є по суті сконцентрованою тепловою енергією. Але при стандартному режимі лінії рисунку вийшли не однорідні, присутній обвуглений шар (рис. 3.15, а).



а



б

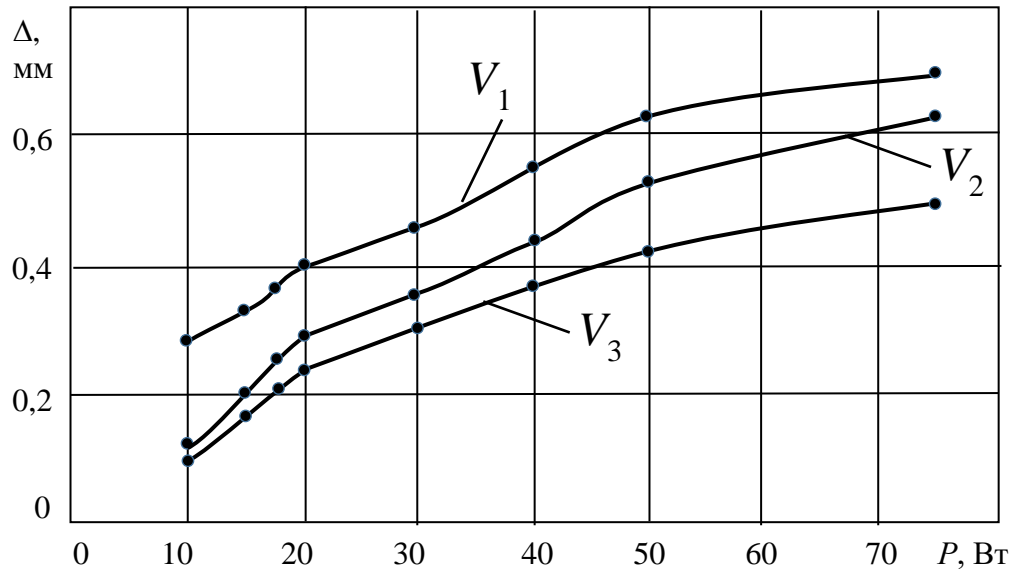
Рис. 3.15. Маркування на сири: а – CO₂-лазер, б – твердотільний лазер

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

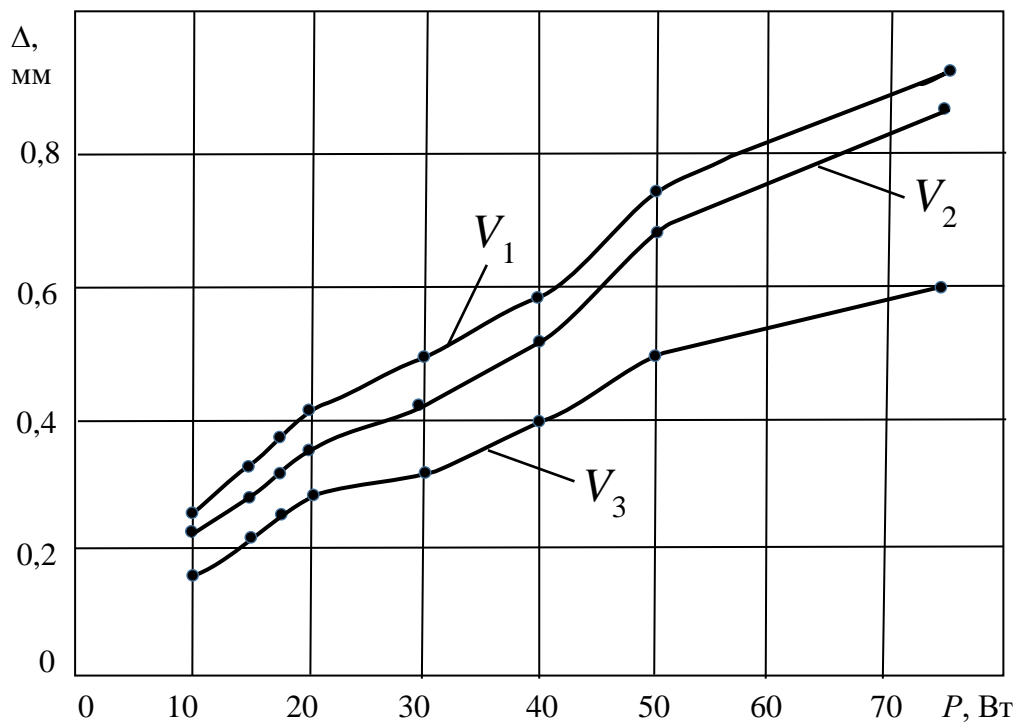
Подальша розробка режимів лазерного маркування твердого сиру проводилася на установці з CO₂-лазером.

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 $V_1 = 0,02$ 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.



а



б

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

Лазерний промінь, потрапляючи на поверхню сиру, видаляв його верхній шар шляхом випаровування. При потужності в 10 Вт лінія була неглибока, зі слабким кольоровим контрастом.

Збільшення потужності призвело до поглиблення ліній і збільшення контрасту. Такий вплив потужності можна пояснити збільшенням температури нагрівання поверхні сиру при обробці. При максимальній потужності обробки спостерігалася обвуглювання поверхні. Зовнішній вигляд маркування представлений на рис. 3.17.



а



б

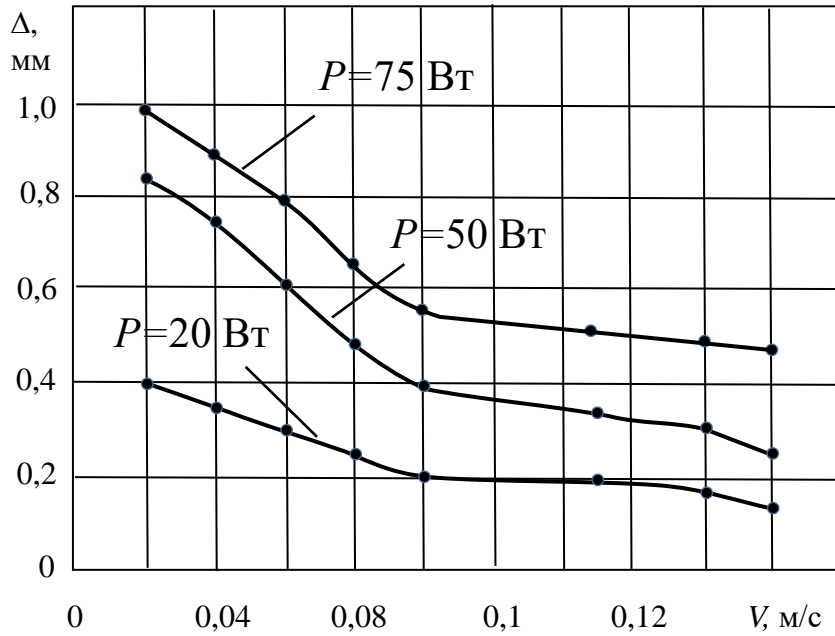
Рис. 3.17. Зовнішній вигляд маркування при швидкості $V_2 = 0,04$ м/с:
а – сир, б – сирний продукт

Зміна швидкостей сканування на $V_2 = 0,04$ м/с і $V_3 = 0,06$ м/с не вплинула на характер залежності, але глибина ліній і їх контрастність при цьому ставала менше. При більшій швидкості маркування ставало менш помітним.

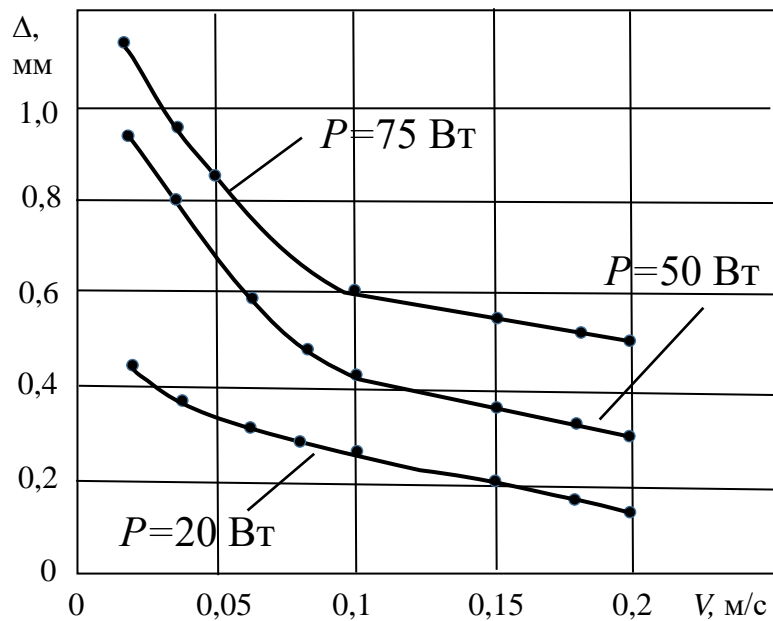
Швидкість сканування також впливає на характер взаємодії лазерного променя з досліджуваним об'єктом. Тому в цій частині експерименту вивчена залежність глибини ліній від швидкості переміщення променя.

В якості постійних величин були обрані такі значення потужності $P_1 = 75$ Вт, $P_2 = 50$ Вт, $P_3 = 20$ Вт. Частота проходження імпу-

льсів 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).



а



б

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

Цікавим результатом є не очікуване зменшення глибини маркування при зниженні потужності випромінювання, а зовнішній вигляд поверхні, представлений на рис 3.19.

Практично у всьому дослідженому діапазоні швидкостей спостерігався обвуглений шар. Зниження потужності до 50 Вт привело до зменшення глибини проплавлення, обвуглення практично не спостерігалось.

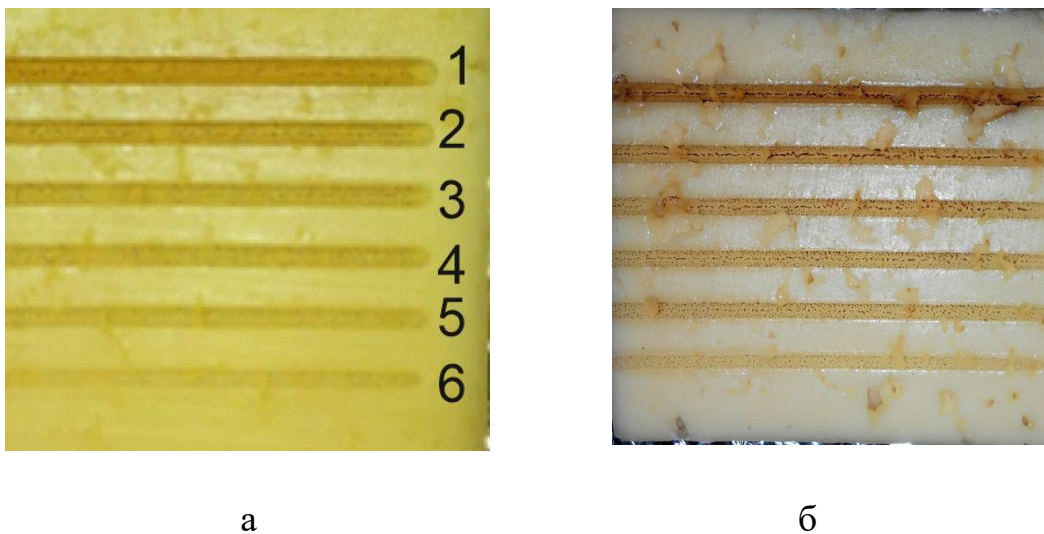


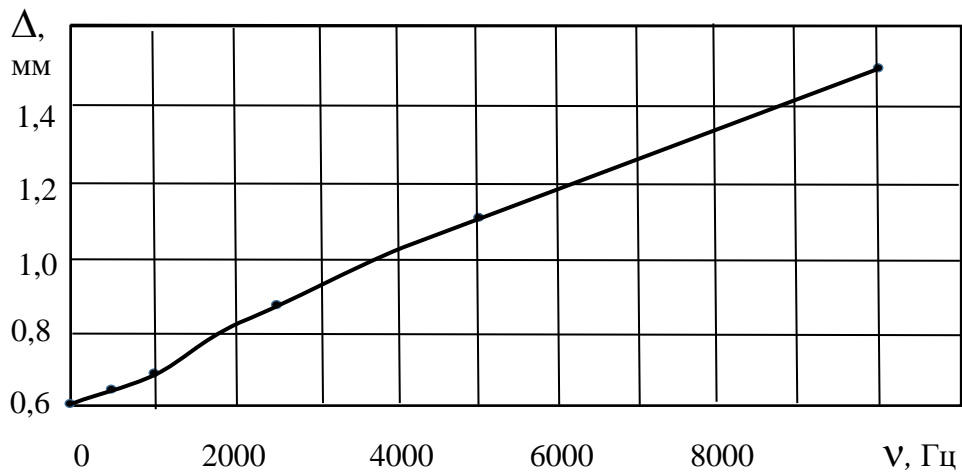
Рис. 3.19. Зовнішній вигляд маркування при потужності 50 Вт:
а – сир, б – сирний продукт

Доріжки 1, 2, 3, 4, 5, 6 отримані при швидкостях: $V_1 = 0,02$ м/с, $V_2 = 0,04$ м/с, $V_3 = 0,06$ м/с, $V_4 = 0,08$ м/с, $V_5 = 0,1$ м/с, $V_6 = 0,2$ м/с відповідно.

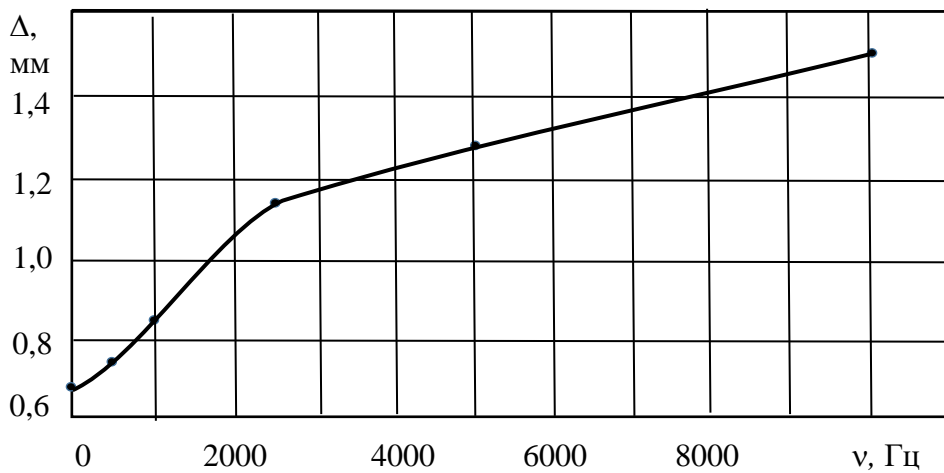
Найбільш суттєво на якість зображення впливає частота проходження імпульсів.

Для дослідження впливу частоти проходження імпульсів була обрана максимальна потужність 50 Вт, при якій не виникає обвуглення.

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



а



б

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

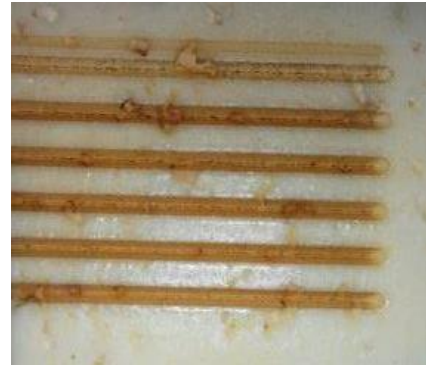
Видно, що із збільшенням частоти проходження імпульсів глибина ліній збільшується. При частоті проходження імпульсів 100 Гц края ліній були чіткими, але поверхня сиру та сирного продукту була обвуглена. Збільшення частоти проходження імпульсів вплинуло на глибину ліній та їх контраст, а також на якість зображення. Найбільш якісне зображення відповідає значенням частоти від 150 до 500 Гц. Зовнішній вигляд маркування представлений на рис 3.21.

Для забезпечення максимального контрасту лазерне маркування повинно бути максимально глибоким, але без обвуглених кра-

їв. Виходячи з виконаних експериментів, можна вибрати оптимальний режим для лазерного маркування сиру та сирного продукту.



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 кірку товару (рис. 3.22), можна рекомендувати ці режими для впровадження у промисловість.



Рис. 3.22. Приклад маркування сиру

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. Дані про взаємодію лазерного випромінення з яєчною шкара-

лупою практично відсутні. Завдання ускладнюється тим, що при маркуванні яєчний білок не повинен нагріватися – нагрів може привести до його «заварювання» і псування яйця в цілому.

Дослід деяких європейських фірм свідчить, що операція маркування повинна виконуватися протягом малого інтервалу часу і на невеликій площині. У зв'язку із зазначеними часовими і просторовими обмеженнями, кількість і складність написів і позначень, що наносяться на яйця, також обмежена, і лазерний маркувальний пристрій повинен забезпечувати нанесення інформації таких розмірів, щоб його можна було вбудувати в сортувальну машину, не створюючи перешкод її роботі [33-35].

Для проведення досліджень був обраний 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 і рештою поверхні.

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

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



Рис. 3.23. Приклад маркування курячого яйця

Зображення чітке, рельєфне. Промінь лазера піддає абляції і плавить матеріал зовнішньої поверхні шкаралупи яйця. При цьому не порушується цілісність структури ячної шкаралупи, оскільки гравірування лазерним променем здійснюється на глибину від 50 до 90 мкм, що становить приблизно 8 % товщини шкаралупи.

Але дослідження показали, що білок, який прилягає до зворотного боку маркованої шкаралупи, прогрівається приблизно до 50 °C і заварюється. При зниженні потужності нижче 90 Вт нагрівання практично не виникає.

Проведені дослідження показують, що для маркування яєць більше значення має час обробки, ніж потужність випромінювання. Час впливу визначається швидкістю сканування. Результати досліджень наведені на рис. 3.24.

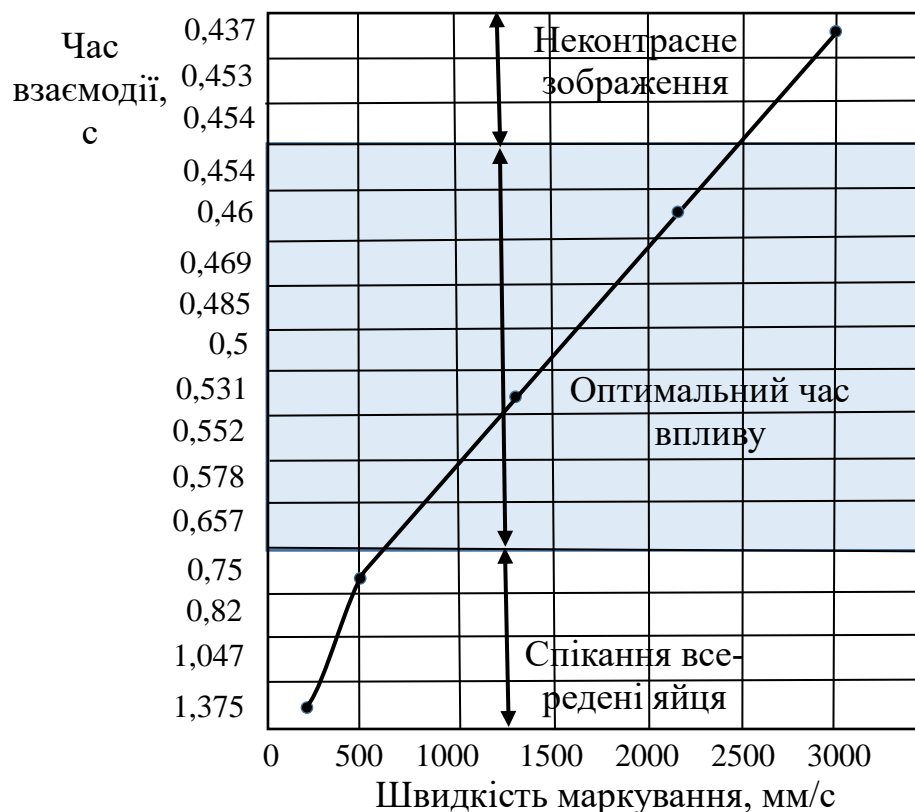


Рис. 3.24. Залежність швидкості маркування від часу впливу на шкаралупу курячого яйця

З цієї причини рекомендується маркувати яйця за час, що дорівнює 450 мс. При цьому фокусна відстань лінзи становить 100 мм, що дозволяє отримати ширину променю або розмір плями приблизно 0,3 мм. Така оптична характеристика дозволяє забезпечити достатню глибину фокусування, а це означає, що яйця не обов'язково повинні бути однакового розміру. Інакше кажучи, 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 контрастного білого кольору, в той час як на яйцях з білою шкаралупою – темно-коричневого кольору (рис.3.25).



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

Висока техніко-економічна ефективність застосування лазерів при маркуванні 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.

4 ЛАЗЕРНЕ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ

4.1 Аналіз традиційних методів очищення поверхні

Якість машин – це сукупність властивостей, що обумовлюють їх придатність задовольняти певні потреби відповідно до призначення. Один з важливіших показників якості машин – надійність. Існує ряд факторів, що визначають надійність машин. В першу чергу це експлуатаційні властивості матеріалу, з якого виготовлені деталі (міцність, втомна міцність, зносостійкість, корозійна стійкість та ін.), мають значення також герметичність з'єднань, міцність посадок та ін. [36].

Всі ці фактори залежать від природи самого матеріалу (його складу, структури, наявності дефектів) та впливу зовнішніх факторів (температури, характеру напруженого стану, середовища тощо), якості поверхневого шару деталей.

Як правило, всі руйнування деталей починаються з поверхні. Таким чином, технічне рішення проблеми підвищення якості машин і приладів в значній мірі обумовлено можливістю технологічного забезпечення якості поверхневого шару деталей, що визначається сукупністю характеристик: шорсткістю поверхні, фізико-механічним станом, мікроструктурою металу поверхневого шару і рівнем залишкових напружень [37].

Зовнішній шар деталі, що має макро- і мікровідхилення від ідеальної геометричної форми і змінені фізико-хімічні властивості в порівнянні із властивостями основного матеріалу, називають поверхневим шаром. Він формується при виготовленні і експлуатації деталі і за глибиною може становити від десятих часток мікрометра до декількох міліметрів [37].

Очищення поверхні для отримання необхідної якості 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.

Очищення в загальному вигляді являє собою операцію видалення поверхневих шарів, які утворені будь-якими забрудненнями або покриттями, іноді навіть включаючи основний шар матеріалу.

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

У процесі свого еволюційного розвитку і вдосконалення, традиційні технології очищення поверхні підійшли до потенційної технологічної межі і в повній мірі не задовольняють дедалі більш зростаючим вимогам промисловості за технологічними, техніко-економічними, екологічними показниками.

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]. При такій малій тривалості енергетичного впливу зона термічного впливу мала і вигоряння хімічних елементів на новоствореній поверхні практично не відбувається.

Висока продуктивність лазерного очищення поверхні, що досягає декількох квадратних метрів на годину, висока екологічна безпека, відсутність витратних матеріалів, висока технологічна відтворюваність процесу, а також можливість комплексно вирішувати проблему очищення поверхні, видаляючи одночасно як органічні, так і неорганічні забруднення, і питання технологічної спадковості поверхневого шару, відкриває широкі потенційні можливості впровадження даної технології в різних галузях промисловості.

В процесі виробництва і експлуатації деталі машин і механізмів піддаються металургійному, механічному, хімічному, термічно-

му і радіаційному впливу, що призводить до значних змін в поверхневому шарі. В результаті технологічних процесів зварювання, обробки тиском (прокатки, волочіння, ковальсько-пресової обробки), механічної обробки (точіння, фрезерування, шліфування та інших видів), а також в процесі експлуатації на поверхні утворюються різного роду органічні і неорганічні речовини – окисні плівки, іржа, окалина, залишаються плями мастильно-охолоджувальної рідини (МОР), масляні плями тощо. Все це має негативний вплив на фізико-механічний стан поверхневого шару, погіршуючи експлуатаційні властивості (зменшується стійкість проти корозії, втомна міцність, зносостійкість деталей машин), а також змінюючи широке коло їх фізико-хімічних властивостей – оптичних, теплофізичних, гідромеханічних та ін.

Традиційно дефекти поверхневого шару металу, органічні і неорганічні забруднення видаляються механічною, ультразвуковою, хімічною та електрохімічною обробкою та іншими методами. До них відносяться шліфування, полірування, струйно-абразивна обробка, знежирення, травлення, активування.

Хімічне знежирення. Органічні забруднення, що знаходяться на поверхні, можуть не тільки зменшувати адгезійну взаємодію покриття, що наноситься, з поверхнею, але і зменшувати змочування поверхні при нанесенні лакофарбового покриття, сприяти підплівковій корозії, приводити до виникнення дефектів в покритті, що наноситься. Для очищення поверхні від забруднюючих органічних речовин (хлоровані і сульфировані олії, жирні кислоти та їх солі, вуглецева сажа та ін.) використовують метод знежирення. Під знежиренням розуміють процес видалення з поверхні органічних забруднень.

Видалення ґрунтується на різних фізико-хімічних процесах, що відбуваються в зоні обробки: розчинення, витіснення, травлення та ін.

Хімічні методи очищення поверхні від забруднень органічного характеру мають такі недоліки:

1. Низька продуктивність.
2. Процес не є екологічним.
3. Потрібні витратні матеріали.
4. Не можливо видаляти забруднення неорганічного характеру.
5. Процес не дозволяє видаляти дефекти поверхневого шару.

Електрохімічне знежирення доцільно застосовувати для зняття з поверхні металу невеликого шару жиру. Зазвичай цьому процесу передують хімічне знежирення, яке видаляє основну масу забруднень. У порівнянні з хімічним, електрохімічне знежирення дає більш якісне очищення поверхні деталі.

Механічна обробка поверхні деталей призначена для очищення поверхні від окисних плівок, окалини, іржі, поверхневих дефектів, неорганічних забруднень (аерозолей, металевих пилю тощо). Основними способами механічної обробки поверхні є шліфування, полірування, віброобробка, струменева абразивна і гідроабразивна обробка.

Шліфування. Недоліком даної технологічної операції є те, що вона сама може вносити в поверхневий шар дефекти і мікрodefekти – припалення, подряпини, мікротріщини, в яких можуть накопичуватися залишки МОР.

Якщо поверхня має складну форму, то шліфування практично важко реалізувати. Шліфувати м'які метали, сталі та сплави важко. Наприклад, видалення поверхневих дефектів в нержавіючій сталі проблематичне.

Полірування поверхні, що має складну геометричну форму, практично виконують вручну. Після полірування в мікропорах, мікротріщинах поверхні можуть залишатися (після знежирення) частки полірувальної пасти, які знижують експлуатаційні характеристики деталі.

Струйну абразивну і гідроабразивну обробку застосовують зазвичай для видалення з поверхні деталей товстого шару термічної окалини, іржі, грату. Абразивним матеріалом служить кварцовий пісок, сталевий дріб, корунд. Вдаряючись об поверхню металу, частинки абразиву збивають забруднення, що міцно пристали до поверхні, надаючи їй матовість і своєрідно розвинений мікрорельєф.

Добираючи абразив певної твердості і зернистості, склад робочої рідини і режим обробки, можна не тільки очистити поверхню металу від механічних і хімічних забруднень, але і досягти ефективного згладжування поверхні.

Основними недоліками струменевої абразивної і гідроабразивної обробки є:

1. Виділення абразивного пилу при абразивній обробці, що вимагає виготовлення або придбання відповідного обладнання.

2. Попадання абразивного пилу або гідроабразивної рідини в мікропори, мікротріщини поверхні погіршує експлуатаційні властивості.

3. Утилізація гідроабразивної рідини.

Додатково можна виділити такі недоліки абразивної обробки:

1. Необхідність демонтажу частини обладнання, яке піддається очищенню, наприклад, лопаток турбін.

2. Не на всі поверхні, що очищаються, абразив діє сприятливо.

3. При піскоструминному очищенні частини обладнання може відбуватися розгерметизація виробу, що є неприпустимим.

4. Поверхня металу після піскоструминного очищення має властивість швидко окислюватися і насичуватися вологою так, що наступна операція забарвлення повинна виконуватися через нетривалий час (не більше 4-х годин).

5. Значні витрати на утилізацію і очищення робочого матеріалу, витрата якого дуже значна.

6. Високі енергетичні витрати на абразивне очищення, які досягають 100 кВт і вище.

Ультразвукове очищення – спосіб обробки поверхні твердих тіл, при якому в миючий розчин вводяться ультразвукові (УЗ) коливання. Введення УЗ дозволяє не тільки прискорити процес очищення, а й отримати високу ступінь чистоти поверхні, а також замінити ручну працю, виключити пожежонебезпечні і токсичні розчинники [38]. 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 мікросхем, хірургічних інструментів, металокерамічних фільтрів, металургійного прокату та ін.

4.2 Фізичні основи лазерного очищення поверхні

Більшість технологічних операцій, що здійснюються за допомогою лазерів, заснована на тепловій дії світла на оброблюваний матеріал. У цьому випадку 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].

Фізичні процеси, що відбуваються при лазерному очищенні поверхні, відрізняються великою різноманітністю і залежать від щільності потужності q_0 лазерного випромінювання на поверхні.

При $q_0 \leq 10^4 - 10^5$ Вт/см² 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 приладів, які з них виготовляються), а також для поділу крихких матеріалів за рахунок механічних напружень.

Підвищення q_0 до $10^5 - 10^6$ Вт/см² призводить до плавлення без викиду матеріалу. Це область деяких операцій лазерного легування а також точкового і шовного зварювання, що має переваги перед контактними способами: зварювання матеріалів, що легко деформуються, у важкодоступних місцях і при мінімумі теплового впливу на сусідні ділянки. При лазерному легуванні реалізується висока чистота процесу модифікування поверхневих шарів матеріалів і в операціях напівпровідникової техніки.

Величина $q_0 \sim 10^6 - 10^7$ Вт/см² дозволяє проводити нагрів з видаленням речовини із зони теплового впливу. Завдяки цьому можна виготовляти отвори (свердлити), фрезерувати, різати практично всі матеріали, скрайбрувати крихкі матеріали, випаровувати, проводити відбір мікропроб для аналітичних цілей.

При $q_0 > 10^7 - 10^8$ Вт/см² утворюється лазерна плазма, що поглинає випромінювання і тим самим ускладнює проведення технологічних операцій. Перехід же в область інтенсивності потужності 10^{16} Вт/см² призводить до розвитку процесів, цікавих в плані отримання високотемпературної плазми.

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

Процеси лазерного нагрівання, випаровування і абляції матеріалу з утворенням плазми, 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 і ступеня очищення.

Таким чином, для очищення становить інтерес 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 потужностями випромінювання.

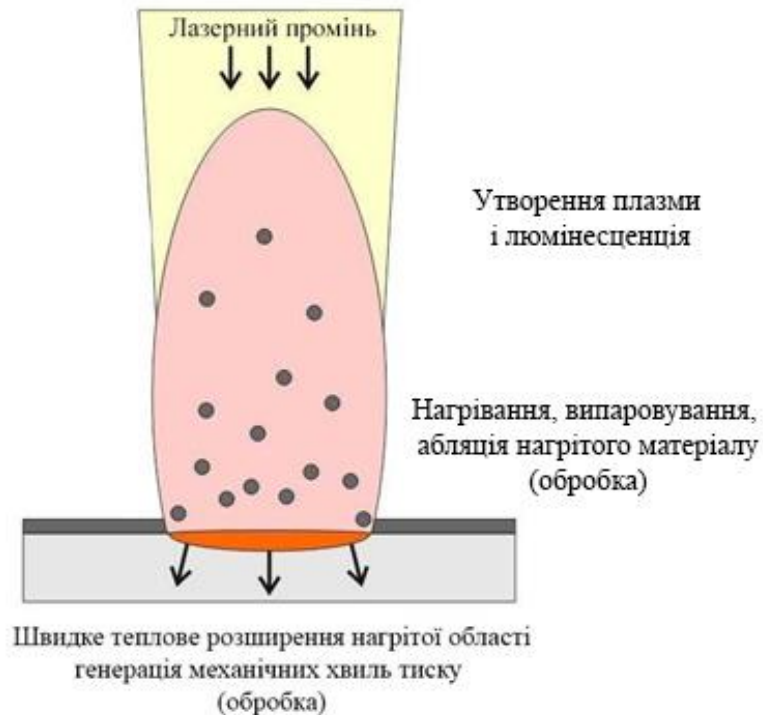


Рис. 4.1. Загальна схема процесів впливу потужного лазерного випромінювання на матеріали при лазерному очищенні поверхні

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

Випарні механізми лазерного очищення. Історично спочатку використовувалися переважно випарні механізми лазерного очищення поверхні [39], коли щільність потужності випромінювання перевищує значення, при якому починається випаровування забруднюючих речовин з поверхні.

В цьому випадку в основі фізики процесу лазерного видалення поверхневих шарів (іржі, окалини, окислів, забруднень, лаків, фарб, жирів та ін.) лежить ефект випаровування, тобто переведення матеріалу з твердої фази в паро-газо-плазмову (рис. 4.2). При цьому бажано мінімізувати утворення рідкої фази.



Рис. 4.2. Приповерхнева лазерна плазма

При очищенні випаровуванням випромінювання імпульсного лазера фокусують на поверхні деталі, причому розмір плями повинен бути таким, щоб щільність потужності випромінювання за період імпульсу приводила до інтенсивного підвищення температури поверхневого шару до температури його швидкого руйнування (випаровування або сублімації). Орієнтовна величина такої щільності потужності становить $10^7 - 10^{10}$ Вт/см². При фокусуванні в пляму розміром близько 0,5 мм для формування такої щільності потужності достатньо лазера з середньою потужністю всього 10 Вт [39].

Значну роль для даного типу очищення грають фізичні властивості оброблюваного матеріалу. Найбільш істотні з них – теплопровідність, прихована теплота випаровування і коефіцієнт відбиття лазерного випромінювання. Якщо виходити з того, що весь матеріал випаровується, то кількість матеріалу, яку можна видалити за допомогою лазера, буде обмежуватися величиною прихованої теплоти випаровування.

Максимальна глибина шару, який випаровується, визначається наступним чином

$$D = \frac{E_0}{A\rho(C(T_1 - T_0) + L)} \quad (4.1)$$

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.

Формула дає лише приблизну оцінку, тому що теплофізичні параметри матеріалів змінюються в залежності від температури зра-зка і довжини хвилі випромінювання. Очищення випаровуванням застосовується, як правило, для видалення забруднень з низькою температурою випаровування або розкладання.

Показник поглинання металів на довжині хвилі 1,06 мкм становить від 10^{-3} см $^{-1}$ до 10^{-4} см $^{-1}$, тоді як показник поглинання неметалевих речовин на кілька порядків нижче і становить від 10^{-1} см $^{-1}$ до 10^{-3} см $^{-1}$. Зі співвідношення (4.1) випливає, що метали на цій довжині хвилі поглинають випромінювання лазера в тонкому поверхневому шарі, тоді як неметалеві речовини мають об'ємне поглинання. Таким чином, при товщині неметалевого забруднення в кілька сотень мікрон припустимо вважати, що цей шар відносно прозорий.

Поширення світла в речовині, як правило, описується законом Бугера-Ламберта-Бера

$$q(x) = q_0(1 - R)\exp(\alpha x), \quad (4.2)$$

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.

Спираючись на викладене вище, опишемо якісно випарний механізм лазерного очищення поверхні металів від неметалевих забруднень (рис. 4.3).

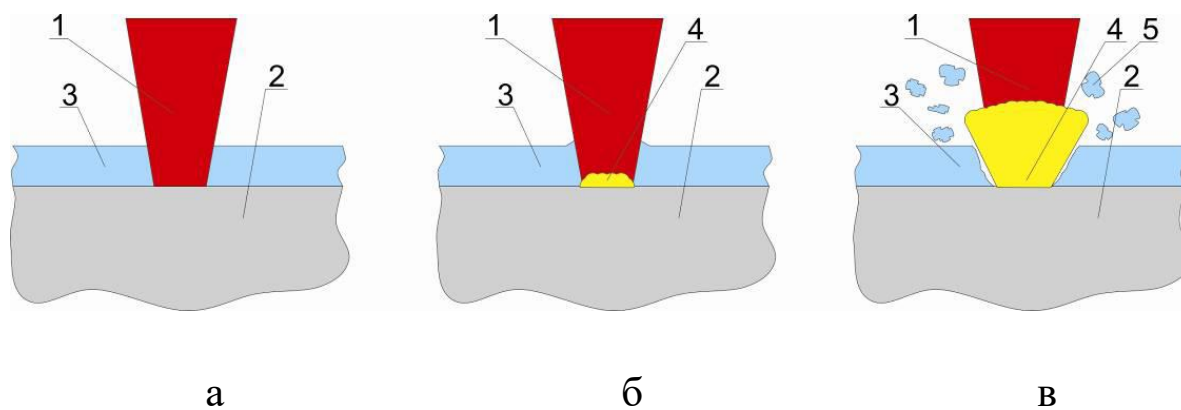


Рис. 4.3. Випарний механізм лазерного очищення: 1 – лазерний пучок; 2 – забруднений матеріал; 3 – забруднення; 4 – хмара випаруваної речовини; 5 – частинки забруднення, які видалені з поверхні матеріалу

Будемо вважати, що лазерний імпульс, потрапляючи на забруднену поверхню, проходить крізь забруднення практично без ослаблення і поглинається в поверхневому шарі матеріалу (рис. 4.3, а). У разі, коли щільність потужності лазерного випромінювання достатня для того, щоб розігріти матеріал (метал) до температури кипіння на границі розділу забруднення – основний матеріал, починається випаровування матеріалу (рис. 4.3, б). Під тиском розігрітої до високих температур пари шар неметалевого забруднення руйнується і видаляється з поверхні матеріалу (рис. 4.3, в).

Крім того, у багатьох випадках тиск розігрітого газу руйнує шар забруднення не тільки в зоні прямого лазерного впливу, але і в прилеглий області, що підвищує продуктивність лазерного очищення. Таким чином, завдання вибору оптимального режиму роботи лазера у випарному режимі очищення зводиться до забезпечення мінімального порогу випаровування речовини основного металу.

Відомо, що в імпульсному режимі впливу 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 тис-

ку останнього. Наприклад, при впливі імпульсу тривалістю 10 нс і потужністю в 10 мДж, сфокусованого в пляму діаметром 0,2 мм, щільність потужності в зоні обробки досягає 3 ГВт/см^2 . При даній щільності потужності глибина прогрітого шару $X_{\text{пр}}$ становить $10^{-4} - 10^{-5} \text{ см}$, при цьому випаровування відбувається практично без утворення розплаву на поверхні речовини (абляція) і модифікація вихідної поверхні мінімальна.

Для цього застосовують імпульсне лазерне випромінювання з короткою тривалістю імпульсу (кілька десятків наносекунд) і високою піковою потужністю, що забезпечує щільність потужності в зоні обробки $10^7 - 10^{10} \text{ Вт/см}^2$ при діаметрі сфокусованої плями пучка лазера приблизно 0,5 мм, з енергією в імпульсі кілька міліджоулей і частотою проходження імпульсів більше 20 кГц.

Ударно-механічне лазерне очищення. У багатьох випадках для зменшення теплового впливу на поверхневий шар основного матеріалу використовуються довипарні режими лазерного очищення (рис. 4.4).

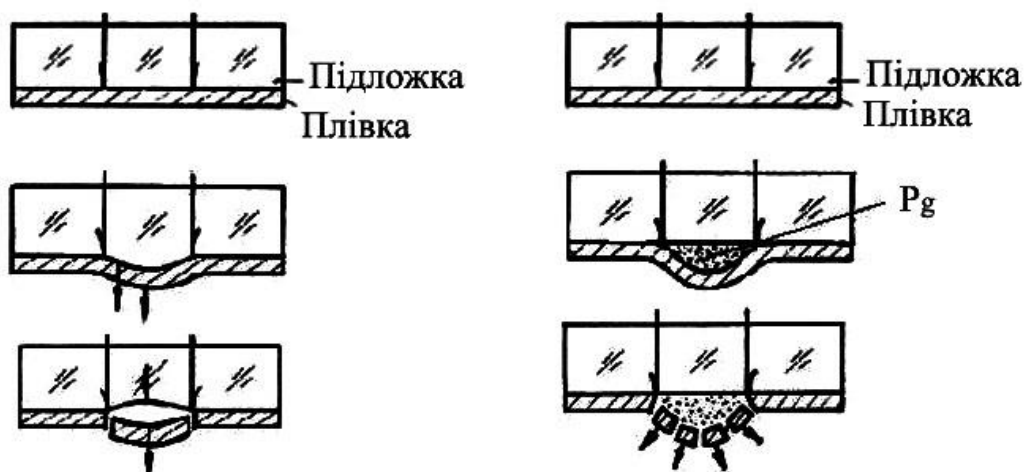


Рис. 4.4. Довипарні низькоенергетичні механізми лазерного очищення [7]

У цьому випадку очищення поверхні твердого тіла від плівок, так само як і від забруднюючих частинок, проводиться на низькоенергетичних режимах, щоб запобігти руйнуванню поверхневих ша-

рів або виникненню в них небажаних фізичних та хімічних змін. У цих умовах найбільш ймовірними фізичними механізмами очищення є ударно-механічні, пов'язані із швидким тепловим розширенням забруднюючих частинок, плівок або поверхневих шарів основного матеріалу при поглинанні лазерного випромінювання і виникненням внаслідок цього ударної хвилі в матеріалі (і в повітрі), а також вибуховим видаленням наявних газів та пари, що утворюється.

Серед термомеханічних явищ переважають поперечне і поздовжнє теплове розширення (ТР) і коливання плівок або частинок забруднення під дією циклічного ТР. Серед вибухових явищ, що виникають через появу надлишкового тиску в порожнинах і зазорах між плівками забруднень, відзначимо підвищення тиску власної пари при нагріванні (великий для дефектної поверхні), десорбцію адсорбованих газів (велика для забрудненої поверхні), газифікацію основного матеріалу (велика при очищенні полімерів, паперу, полотна, фарбових шарів та ін.), а також шару з низькою теплою випаровування, який спеціально вноситься в систему, наприклад, вода. При цьому механізм очищення поверхні від плівок забруднень відрізняється для частинок тим, що процесу видалення забруднення передують фрагментація (руйнування суцільної плівки на фрагменти).

Розрізняють механізми і технології сухого та вологого 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).

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).

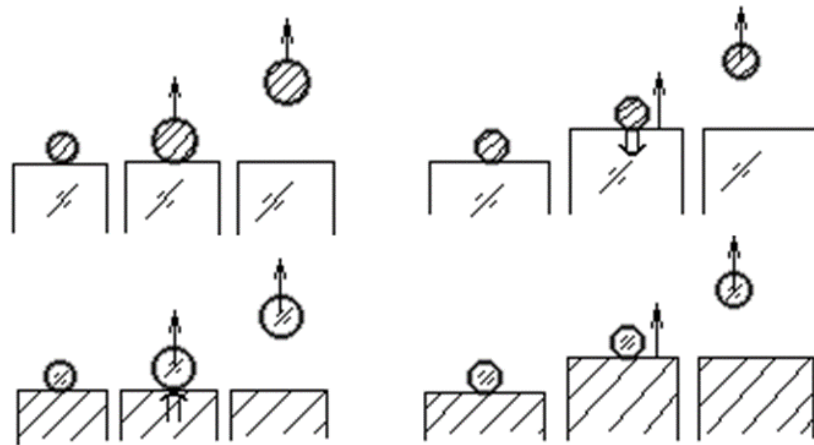


Рис. 4.5. Ілюстрація фізичних механізмів сухого лазерного очищення поверхні для випадків різного поєднання прозорих і непрозорих забруднень та основного матеріалу (метал, скло)

Основними термомеханічними механізмами видалення плівок і частинок є:

- «струшування» забруднень з поверхні при термічному розширенні підкладки;
- відрив забруднень від поверхні внаслідок зсуву центру маси плівки;
- викид фрагментів забруднень з поверхні в результаті дії в них термічних напружень.

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. Радіальне теплове розширення пружного шару призводить до виникнення в ньому термічних напружень стиску, що може бути причиною абляції плівки.

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

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 плівки) та ін.

Фізичний механізм видалення плівки з поверхні твердого тіла, що превалює, в довивпарному режимі залежить від пружних властивостей матеріалу поверхневого шару і його структури.

Завдання полягає у випаровуванні шару рідини (нагадаємо, що для випаровування водних розчинів їх досить нагріти всього до 100 °С або трохи вище), кипіння якого руйнує і виносить забруднення.

При поглинанні лазерного випромінювання в основному матеріалі рідина поблизу його поверхні нагрівається до температури, яка перевищує температуру її кипіння при нормальному тиску, що необхідно для ініціювання об'ємного (бульбашкового) кипіння.

Вологе лазерне очищення поверхні від сильно поглинаючих випромінювання забруднень (наприклад, металевого пилу) 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 ізотерми на поверхні, що відповідає температурі кипіння $T_{\text{кп}}$.

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

Навколо поверхні утворюється розширення і з часом поглиблюється паровий канал, тиск парів в якому максимальний в його нижній частині. У міру розвитку парового каналу область ефективного випаровування переміщається нижче, при цьому перпендику-

лярна поверхні підкладки складова сил тиску F_n виявляється спрямованою вгору і при $F_n > F_\alpha$ виштовхує частку з поверхні підкладки.



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

Природно, що енергетичні пороги вологого лазерного очищення в 2 – 3 рази нижче, ніж сухого.

При необхідності очищення поверхні в області механічних дефектів (подряпини, тріщини та ін.) обробка поверхні в довипарних 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 устаткування для лазерного очищення від іржі і технологічних забруднень

Взаємодія падаючого потоку лазерного випромінювання з матеріалом залежить від трьох складових – відбитого, поглиненого і випромінювання, що пройшло крізь матеріал.

Зі зменшенням довжини хвилі збільшується енергія лазерного випромінювання

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

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 кількістю поглиненої енергії. Поглинальна 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.

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 добре поглинається іржею, і погано – основним металом.

Відпаяні CO_2 -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 відбувається на переході між двома коливальними рівнями молекули CO_2 , а N_2 і He використовуються для підвищення ККД.

Ці лазери зараз є одними з найпотужніших (приблизно 80 кВт) і найбільш ефективних (ККД приблизно 15 – 20 %). Довжини хвиль генерації становлять 10,6 і 9,5 мкм.

Через близьке розташування лазерних рівнів до основного має місце сильна температурна залежність інверсії, що змушує використовувати примусове водяне охолодження газової суміші.

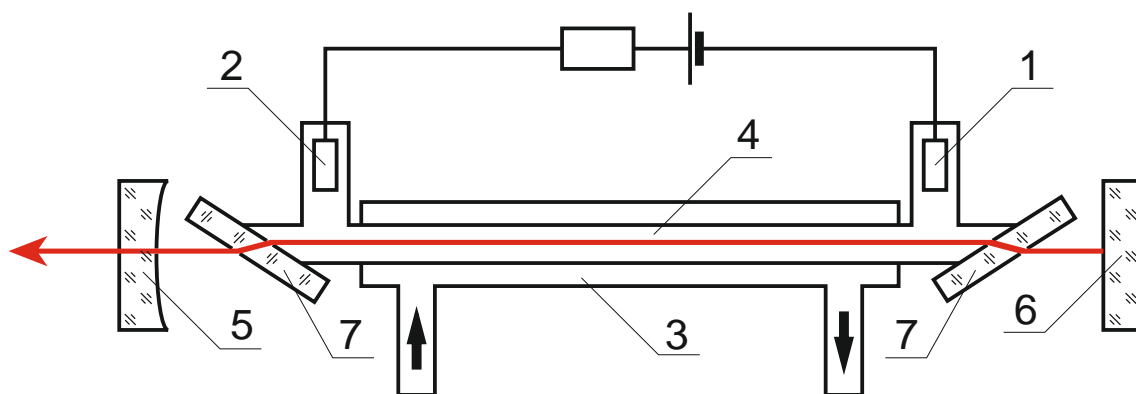


Рис. 4.7. Умовна схема розрядної трубки CO_2 -лазеру: 1 – катод; 2 – анод; 3 – оболонка водяного охолодження; 4 – розрядний капіляр; 5 – «напівпрозоре» дзеркало; 6 – «глухе» дзеркало; 7 – вікна Брюстера

Для послаблення впливу дисоціації молекул CO_2 на рівень вихідної потужності застосовують баластні об'єми, що в 20 – 50 разів перевищують об'єм розрядного капіляра. Для регенерації молекул CO_2 використовують генератори кисню у вигляді ємностей з солями типу KMnO_4 , KClO_3 або оксидами міді, що нагріваються розрядом.

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 ме-

талеву 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 відпаяного CO₂-лазера Resi 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 $\times 100$. Ступінь очищення від окалини та іржі визначають за допомогою пластини з прозорого матеріалу з взаємно перпендикулярними лініями, що утворюють квадратики розмірами 2,5 \times 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.

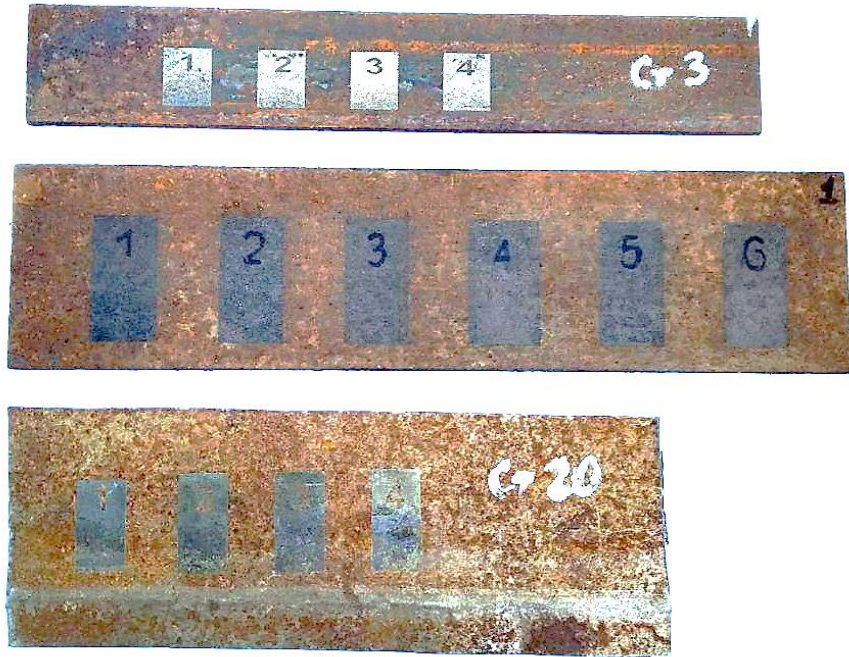


Рис. 4.8. Сталеві зразки

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

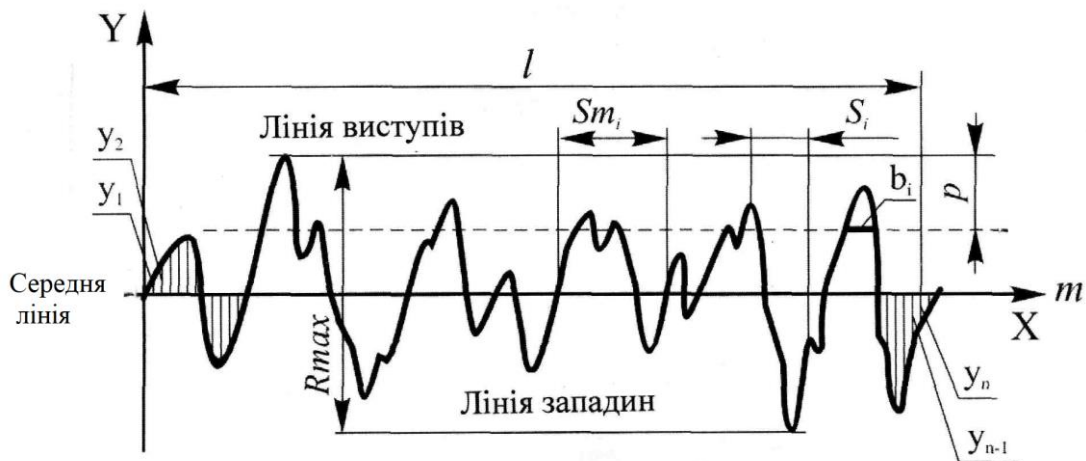


Рис. 4.9. Дійсний профіль (профілограма) поверхні та параметри шорсткості

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). Числові значення базової довжини вибирають з ряду: 0,01; 0,03; 0,08; 0,25; 0,8; 2,5; 8; 25 мм. 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 (залізо) окислюється з утворенням гідроксиду заліза $Fe(OH)_3$



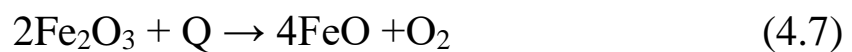
Гідроксид заліза (III) дуже нестійкий, швидко втрачає воду і перетворюється в оксид заліза (III) Fe_2O_3 . Це з'єднання не захищає поверхню заліза від подальшого окиснення. В результаті залізний предмет може бути повністю зруйнований.

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

При нагріванні до $500 - 600^\circ\text{C}$ і вище утворюється оксид FeO (окалина)



Утворенням окалини супроводжуються процеси термічної обробки і зварювання. Лазерне випромінювання викликає швидкісне нагрівання до температур $900 - 1300^\circ\text{C}$. Під дією лазерного променя на окисленій поверхні відбуваються такі реакції



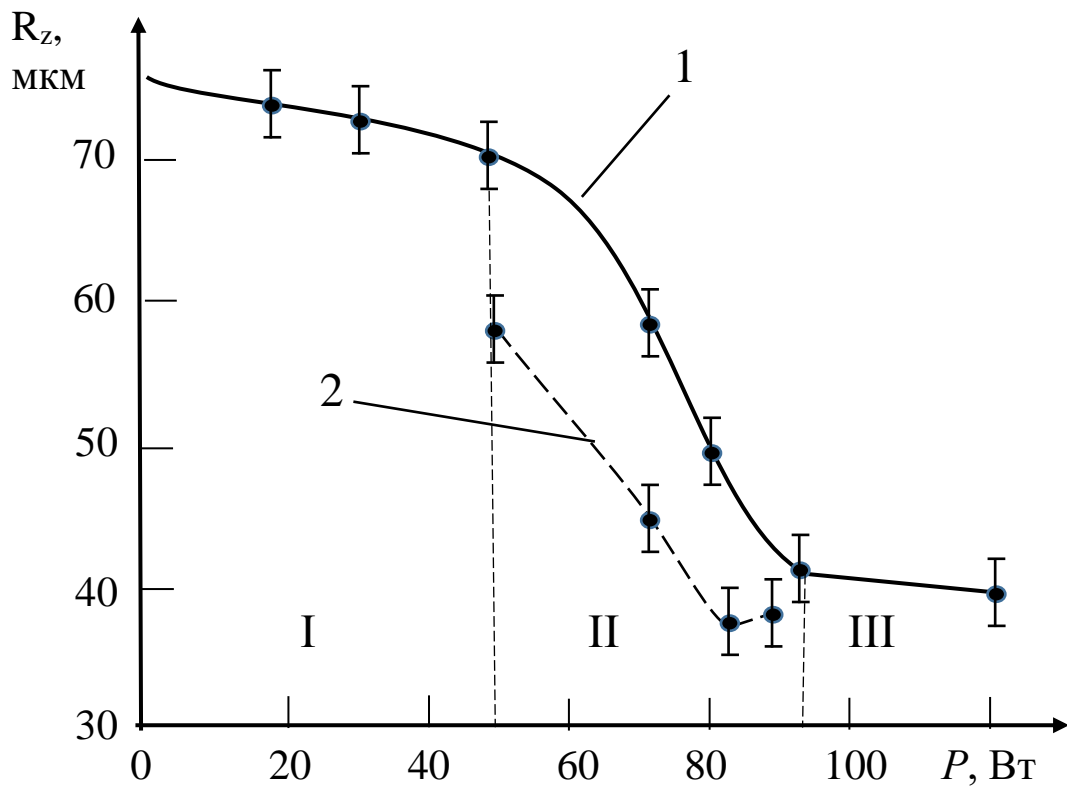
Відновлення металу з оксидів вимагає великої кількості енергії, джерелом якої в даному випадку є лазер. При надлишку тепла система «іржа – метал» переходить в більш стійкий стан при звільненні атомів кисню [45].

Найбільш істотно на процес очищення впливає потужність випромінювання, яка саме визначає кількість тепла, що потрапляє на оброблювану поверхню. В якості контролю впливу потужності на якість очищення використовувалися металографічні дослідження поверхні та вимірювання шорсткості.

Обробка поверхні проводилась в імпульсно-періодичному режимі при незмінних умовах фокусування, частоті проходження імпульсів 30000 Гц і швидкості сканування 200 мм/с.

Дослідження проводилися на зразках з шаром іржі $0,6 - 0,8$ мм. Залежність шорсткості поверхні від потужності випромінюван-

ня та кількості проходів наведена на рис 4.10.



а



б

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

Крива 1 характеризує залежність шорсткості поверхні від випромінювання для одного проходів, на ній простежуються три зони.

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 приповерх-

рхневий шар.

Для зони III характерні повне випаровування іржі, середня шорсткість поверхні, повна металізація та оплавлення приповерхневого шару.

Вид поверхні зразків до та після очищення на різних режимах показаний на рис. 4.11.

Дослідження поверхні показали, що потужність випромінювання має суттєвий вплив на якість очищення. 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). Мікротвердість поверхневого шару зразка із сталі 20 у нормалізованому стані і після металізації поверхні у процесі лазерної очистки становить 1740 – 2000 МПа.

Ці утворення не мають значної адгезії з металом і легко видаляються.

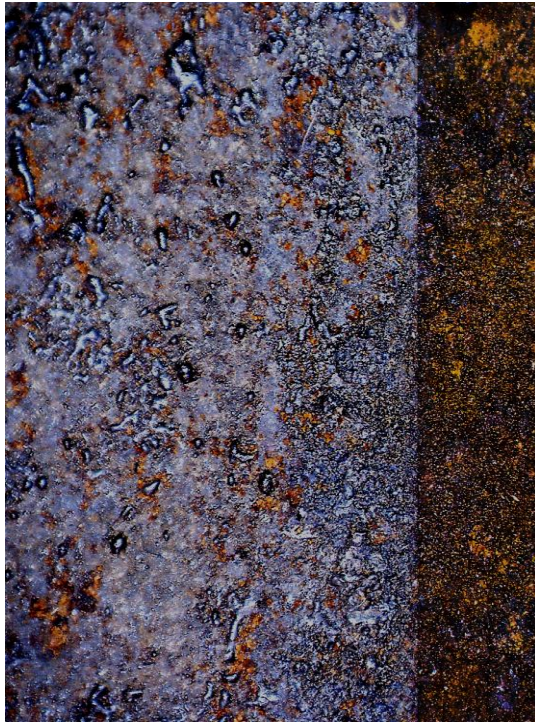
Зі збільшенням потужності металізація поверхні збільшується, а при потужності більше 95 Вт починається оплавлення поверхні.

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 прохід більш потужний, ніж другий; проходи мають однакову потужність.

Перший варіант був відкинутий одразу. Обробка за такою схемою сприяла утворенню на поверхні окалини FeO, яка має дуже високу (до 70 %) відбивну здатність, тому подальша обробка підвищувала енерговитрати.

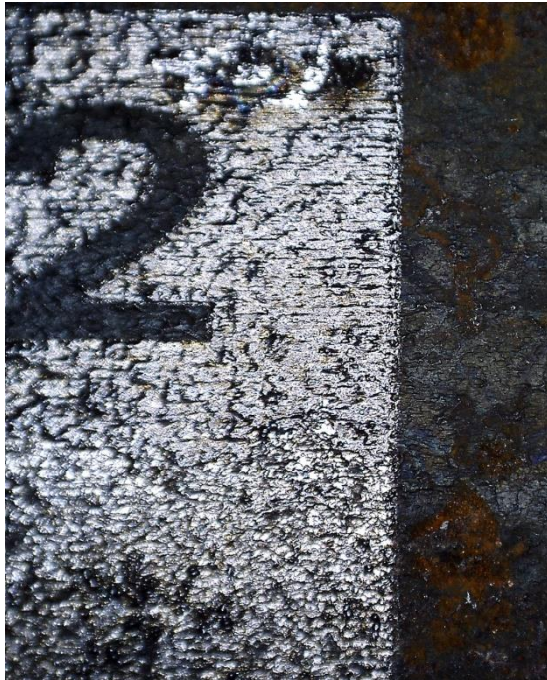
Обробка однаково потужними проходами сприяє оплавленню поверхні вже при 75 – 80 Вт.



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.

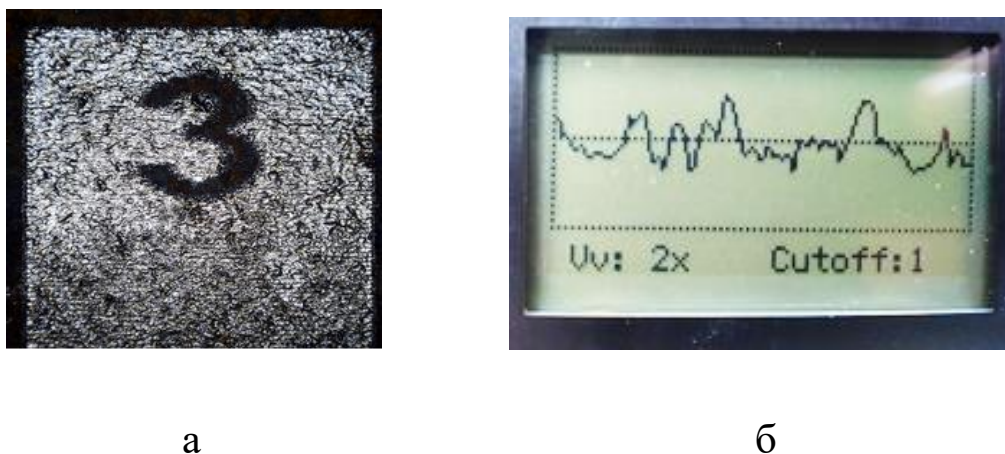


Рис. 4.12. Вид поверхні (а) та профілограма (б) сталевого зразка після очищення від іржі у два проходи

Обробка в два проходи сприяє повній металізації поверхні із шорсткістю 33 – 45 мкм без оплавлення поверхневого шару.

Для очищення лакофарбових покриттів потужність може коливатися від 20 Вт до 50 Вт в залежності від кількості шарів покриття. Якщо забруднення більш складне або комбіноване з іржею, то слід орієнтуватися на режими для очищення іржі за два проходи.

На якість лазерного очищення істотно впливають умови фокусування лазерного випромінювання – діаметр плями фокусування, фокусна відстань оптичної фокусуєчої системи, ступінь поляризації випромінювання, закон розподілу щільності потужності за перетином пучка і зміщення фокальної площини відносно поверхні оброблюваного матеріалу.

Для конкретної лазерної установки можна змінювати положення фокальної площини відносно оброблюваної поверхні і пов'я-

заний з цим параметром діаметр плями фокусування. На рис. 4.13 наведені схеми положення фокальної площини відносно оброблюваної поверхні.

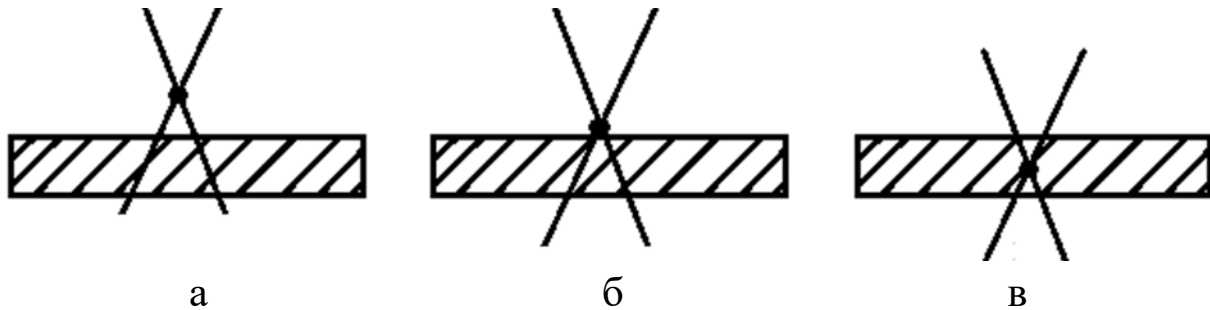


Рис. 4.13. Положення фокальної площини

На рис. 4.14 показана різниця якості обробки поверхні при різних умовах фокусування.

Аналізуючи отримані результати очищення для різного положення фокальної площини (рис. 4.14), можна зробити висновок, що положення фокальної площини над поверхнею (а) та на поверхні (б) є оптимальним положенням для очищення поверхні за допомогою цієї установки.

Раніше в дослідженнях вчених було показано, що застосування води в якості допоміжної речовини мало позитивний вплив на якість лазерного очищення. Проведене вологе очищення поверхні показало, що утворення пари води під дією лазерного випромінювання призводить до підвищення енерговитрат і погіршення стану поверхні.

Особливо сильно пари води поглинають хвилі ІЧ-діапазону, а в середній інфрачервоній області інтенсивним поглиначем є вуглекислий газ. Таким чином, попереднє змочування поверхні при очищенні від іржі за допомогою CO_2 -лазеру недоцільне.

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.



а

б

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

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. 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

На основі проведеного аналізу можна зробити наступні висновки.

В результаті використання лазерного променя для обробки матеріалів з'являється можливість внесення докорінних змін в технологію виготовлення виробів.

Таким способом зміцнення можна змінити властивості різних ділянок деталі, виготовленої з порівняно недорогого конструкційного матеріалу, і отримати сплави з унікальними характеристиками міцності, зносостійкості і корозійної стійкості.

Показано, що для поверхневого зміцнення можливе використання лазерів малої потужності в імпульсному режимі. Для сталей з різним вмістом вуглецю при лазерному гартуванні визначені оптимальні величини тривалості імпульсів. Встановлено, що більше зміцнення має місце при обробці сталі із структурою пластинчастого перліту. Дослідження показали, що лазерне гартування дає більш високі значення мікротвердості, ніж об'ємне, причому максимальний приріст мікротвердості досягається на низьковуглецевій сталі 20. При багатоімпульсній обробці сталей, коли довжина імпульсу менше, ніж при одноімпульсній, інтенсивність зміцнення вище, а якість обробленої поверхні краще. Однак рекомендувати таку обробку можна тільки для тих виробів, де не потрібна висока якість поверхні. Одноімпульсна і багатоімпульсна обробка супроводжуються частковим оплавленням поверхні сталевих виробів. 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.

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 металу 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.

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-лазеру в імпульсно-періодичному режимі.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 664 с.
2. Шастин В. И. Современное состояние и перспективы промышленного использования лазерных технологий в машиностроении. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2008. № 4. С. 60-66.
3. Семенов О. Л., Шастин В. И., Ермаков М. А. Разработка технологии лазерного упрочнения штампового оборудования. *Молодой ученый*. 2018. №12. С. 48-50.
4. Крылов К. И., Прокопенко В. Т., Митрофанов А. С. Применение лазеров в машиностроении и приборостроении. Л. : Машиностроение, 1978. 335 с.
5. Григорьянц А. Г., Сафонов А. Н. Лазерная техника и технология : в 7-ми кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки : учебн. пособие для вузов / под ред. А. Г. Григорьянца. М. : Высшая школа, 1987. 191 с.
6. Коваленко В. С., Головкин Л. Ф., Черненко В. С. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. К. : Техника, 1990. 192 с.
7. Владимиров О. В. Упрочнение рабочих поверхностей деталей и измерительного инструмента высокой точности с помощью СО₂-лазера. *Металловедение и термическая обработка*. 1983. №5. С. 17-18.
8. Мощенок В. И., Лалазарова Н. А., Тимченко О. Н. Измерение микротвёрдости с наноточностью. *Вестник ХНАДУ*. 2008. Вып. 42. С. 83-85.
9. Мачехин Ю. П., Афанасьева О. В., Лалазарова Н. А. Особенности применения лазерных технологий поверхностной обработки материалов. Сб. научн. трудов I-й Междунар. конф. "Электронная

компонентная база. Состояние и перспективы развития" в рамках 3-го Междунар. радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития". Т. III. Харьков : АН ПРЭ. ХНУРЭ. 2008. С. 315-317.

10. Мачехин Ю. П., Афанасьева О. В., Лалазарова Н. А. Применение импульсных лазеров малой мощности для поверхностной закалки сталей. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. научн. трудов*. 2008. Вып. 3 (59). С. 97-100.

11. Афанасьева О. В., Мачехин Ю. П., Лалазарова Н. А., Свергун Т. Ю. Особенности применения импульсных лазеров малой мощности для термического упрочнения железоуглеродистых сплавов. Сб. научн. трудов 2-й междунар. научн. конф. «Электронная компонентная база. Состояние и перспективы развития». Харьков-Кацивели, 2009. С. 125-127.

12. Афанасьева О. В., Лалазарова Н. А. Поверхностное упрочнение сталей лазерами малой мощности. *Прикладная радиоэлектроника*. 2013. Том 12, № 3. С. 242–246.

13. Афанасьева О. В., Лалазарова Н. А., Федоренко Е. П. Использование лазеров малой мощности в промышленных технологиях. *Радиотехника*. 2013. Вып. 175. С.63–68.

14. Владимиров О. В. Упрочнение рабочих поверхностей деталей и измерительного инструмента высокой точности с помощью СО₂-лазера. *Металловедение и термическая обработка*. 1983. №5. С. 17-18.

15. Бураков В. А., Федосиенко С. С. Формирование структур повышенной износостойкости при лазерной закалке металлообрабатывающего инструмента. *Металловедение и термическая обработка*. 1983. №5. С. 16-17.

16. Лазерная закалка сталей в различном исходном состоянии / О. В. Афанасьева и др. *Вопросы проектирования и производства*

конструкций летательных аппаратов: сб. научн. трудов, 2013. Вып. 3 (75). С.72-76.

17. Исследование режимов многоимпульсного лазерного термоупрочнения стали / О. В. Афанасьева и др. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. научн. Трудов*. 2011. Вып. 3 (67). С.105-110.

18. Афанасьева О.В., Лалазарова Н.А. Влияние параметров импульсной лазерной закалки на структуру и свойства углеродистых сталей. *Прикладная радиоэлектроника*. 2015. Т. 14, №3. С. 262-266.

19. Изменение структуры малоуглеродистой стали под действием импульсного лазерного излучения / И. В. Дощечкина и др. *Вопросы проектирования и производства конструкций летательных аппаратов: сб. научн. Трудов*. 2015. Вып. 2 (82). С.84-88.

20. Афанасьева О. В., Дощечкіна І. В., Лалазарова Н. О., Ситников П. А. Дослідження впливу імпульсного лазерного гартування на властивості вуглецевих сталей. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції MicroCad-2018 : у 4 ч. Харків : НТУ "ХП", 2018. С. 266-267.

21. Вейко В. П., Метев С. М. Лазерные технологии в микроэлектронике. София : Изд-во Болг. АН, 1990. 361 с.

22. Горный С. Г., Емельченков И. Р. Лазерная маркировка. В кн. Лазерная технология и ее применение в металлообработке. Л. : ЛДНТП, 1990. С. 42–47.

23. Афанасьева О. В., Лалазарова Н. А. Разработка режимов лазерной маркировки коррозионно-стойких сталей. *Сучасне матеріалознавство: ідеї, рішення, результати* : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. Харків : ХНАДУ, 2019. С. 120-122.

24. Афанасьева О. В., Лалазарова Н. О. Технологія лазерного кольорового маркування сталей. *Вісник ХНАДУ*. 2020. Вып. 88. С. 137-142.

25. Веденов А. А., Гладуш Г. Г. Физические процессы при лазерной обработке материалов. М. : Энергоатомиздат, 1985. 208 с.
26. C. Emmelmann. Introduction to Industrial Laser Materials Processing. Rofin-Sinar, Hamburg, 1998, p.180.
27. Маркировка пищевых продуктов: предоставление информации для потребителей продуктов питания. *Качество продуктов*. 2015. №4. С. 74-79.
28. ДСТУ 2887-94. Пакування та маркування. Терміни та визначення. – Введ. 2008-12-07. Київ, 2008. 30 с.
29. Сможет ли лазерное тату заменить этикетки на фруктах : веб-сайт URL : <http://laserfood.es/index.php/en/technology> / (Дата звернення 04.04.2019).
30. Теория лазерной гравировки : *интеракт. учеб. Основы лазерной обработки* : веб-сайт URL : <http://laser-hit/2012-01-19-18-15-56/51> – 24.04.2012 / (Дата звернення 04.04.2019).
31. Влияние лазерной маркировки на качество мандаринов во время хранения / Суд П., Ференц С., Нарциско Дж., Эччеверрия Е. Штат Флорида : садоводческое общество университета Флориды, 2008. С. 297-300.
32. Бие Л., Джонсон Г. Свойства некоторых молочнокислых бактерий, используемых в производстве сыра. II. Эксперименты с жидкостью сырного продукта и сыра. *Milchwissenschaft*, 1975. С. 739-747.
33. Вакс Е. Д. Практика прецизионной лазерной обработки. М. : Техносфера, 2013. 696 с.
34. Лазерные маркираторы : веб-сайт URL : <http://eurojet.com.ua/e-solarmark> (Дата звернення 04.04.2019).
35. Лазерные маркираторы : веб-сайт URL : <http://www.niilt.kharkov.com/rofin> (Дата звернення 04.04.2019).
36. Матеріалознавство : підручник / Дяченко С. С. , Дощечкіна І. В., Мовлян А. О., Плешаков . Х. : Вид-во ХНАДУ, 2007. 440 с.

37. Гаркунов Д. Н. Триботехника. М. : Машиностроение, 1985. 424 с.
38. Кравцов В. В., Кузеев М. И., Шингаркина О. В. Ремонт и изготовление защитных покрытий технологического оборудования и трубопроводов. Уфа : Изд-во УГНТУ, 2001. 76 с.
39. Лазерная очистка в машиностроении и приборостроении / Вейко В. П., Смирнов В. Н., Чирков А. М., Шахно Е. А. Санкт-Петербург: НИУ ИТМО, 2013. - 103 с.
40. Смирнов В. Н., Скрипченко А. И., Медвецкий В. М. Очистка лазерным излучением. *РИТМ*. 2008, май. С. 64-66.
41. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, силовая оптика / В. П. Вейко, М. Н. Либенсон, Г. Г. Червяков, Е. Б. Яковлев. М. : Физматлит, 2008. 312 с.
42. Лукьянчук Б. С., Жэнг Ю. В., Лу И. Ф. К вопросу о механизме сухой лазерной очистки. *Известия РАН, сер. «Физика»*. Т. 65, №4. С. 591–600.
43. Реди Дж. Промышленные применения лазеров. М. : Мир. 1981. 638 с.
44. ДСТУ ГОСТ 25142:2009 Шероховатость поверхности. Термины и определения. – Введ. 01.02.2009. Київ, 2008. 8 с.
45. Панченко В. Я., Голубев В. С., Васильцов В. В. Лазерные технологии обработки материалов: современные проблемы фундаментальных исследований и прикладных разработок. М. : Физматлит, 2009. 663 с.

ЗМІСТ

Вступ	3
1 ВЗАЄМОДІЯ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З РЕЧОВИНОЮ.....	6
1.1 Основні фізичні процеси лазерних технологій.....	6
1.2 Особливості лазерного випромінювання як інструмен- ту.....	14
1.3 Устаткування та вибір режимів лазерної оброб- ки.....	15
2 ПОВЕРХНЕВЕ ЛАЗЕРНЕ ЗМІЦНЕННЯ	22
2.1. Обладнання для поверхневого зміцнення	22
2.2 Визначення мікротвердості.....	24
2.3 Зміцнення одноімпульсною лазерною обробкою.....	26
2.4 Зміцнення багатоімпульсною лазерною обробкою.....	29
3 ТЕХНОЛОГІЯ ЛАЗЕРНОГО МАРКУВАННЯ СТАЛЕЙ.....	34
3.1 Загальна характеристика процесів лазерного маркування... ..	34
3.2 Лазерне кольорове маркування.....	37
3.3 Маркування полімерів.....	45
3.4 Маркування продуктів харчування.....	49
4 ЛАЗЕРНЕ ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ МЕТАЛІВ.....	64
4.1 Аналіз традиційних методів очищення поверхні.....	64
4.2 Фізичні основи лазерного очищення поверхні.....	69
4.3 Вибір устаткування для лазерного очищення від іржі і технологічних забруднень.....	79
4.4 Розробка режимів лазерного очищення від іржі і технологічних забруднень.....	84
Висновки.....	92
Список літератури.....	94

Наукове видання

АФАНАСЬЄВА Ольга Валентинівна

ЛАЛАЗАРОВА Наталія Олексіївна

ФЕДОРЕНКО Євгенія Петрівна

ЛАЗЕРНА ПОВЕРХНЕВА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ

МОНОГРАФІЯ

Відповідальний випусковий *Ю.П. Мачехін*
Комп'ютерна верстка *Лалазарова Н.О.*
Дизайн *Афанасьєва О.В.*

В авторській редакції

Підписано до друку 03.09.2020 р.
Формат 60х90/16. Папір офсетний.
Гарнітура «Times New Roman». Друк – лазерний.
Наклад 100 прим. Замов. № 324

Видавець ФОП Панов А.М.
Свідоцтво серії ДК № 4748 от 06.02.2015 р.
61072, м. Харків, вул. Жон Мироносиць, 10, оф.6.
Тел. :+38(057) 714-06-74,+38(050) 976-32-87
copy@vlavke.com

Надруковано в типографії
ТОВ «Цифрова типографія»
м. Харків, вул. Данилевського, 30.