Лекція 3

Лазерне зміцнення поверхонь

Зміцнення поверхневих шарів металевих сплавів під час лазерної обробки відбувається в результаті надвисоких швидкостей нагрівання та охолодження, часткового легування азотом, вуглецем, тощо, які знаходяться у навколишньому середовищі, зростанням густини дефектів кристалічної будови у ЗЛД і т. і . В результаті лазерної обробки в матеріалі можуть відбуватися фазові перетворення, що супроводжуються утворенням специфічних ультра дисперсних структур з унікальними властивостями.

Важливе місце в технології займає зміцнення поверхні лазерним випромінюванням без зівни її форми. Таке зміцнення досягається при зміні структури матеріалу, коли рівень потужності випромінювання не є достатнім для розплавлення зони (так званий режим перед оплавлення). При цьому зберігається вихідна якість поверхні (шорсткуватість).

Під час лазерної обробки в режимі оплавлення порушується вихідна жорсткуватість поверхонь. При застиганні розплавленої купелі може утворюватися дрібнодисперсна глобулярна структура.

Ці два види лазерної обробки можуть відбуватися як в атмосфері повітря, так і в атмосфері захисного середовища, (наприклад, в атмосфері аргону).

При іншому виді зміцнення поверхонь, лазерному легуванні, необхідною є наявність спеціального середовища (у будь-якому вибраному агрегатному стані), елементами якого відбувається насичення поверхневого шару. В цьому випадку на поверхні утворюється новий, відмінний від матричного складу, сплав.

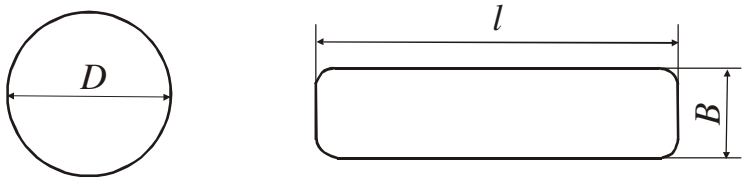
Ще однією з різновидностей зміцнення поверхонь є аморфізація. Проте отримати аморфний матеріал на поверхні можна далеко не у всіх матеріалів. І навіть сплави, які легко аморфізуються (наприклад, системи Fe-B), вимагають надвисоких швидкостей охолодження, що досягається, як правило, за допомогою наносекундних імпульсних лазерів.

3.1 Зміцнення імпульсним випромінюванням

Основу процесу зміцнення поверхонь імпульсним лазерним випромінюванням складає отримання незначної за розміром ЗЛД одиничним імпульсом. Оскільки подача енергії в ЗЛД є дискретною, то такий вид поверхневої обробки надає широких можливостей для точного управління процесом, що робить доцільним можливість використання імпульсного ЛВ для виконання прецизійних операцій. Значний вплив на характеристики зміцнення мають такі параметри, як схема обробки, енергетичні характеристики випромінювання, природа матеріалу, що оброблюється.

Схеми обробок

При використанні імпульсної лазерної обробки фокусування пучка відбувається або за допомогою сферичної (*а*), або за допомогою циліндричної (*б*) оптики. У першому випадку ЗЛД має форму круга з діаметром *D*, у другому – прямокутника з шириною *B* та довжиною *l*, який має дещо закруглені краї (рис. 3.1).



а) *б*)

Рис. 3.1

Найчастіше використовується фокусування променя за допомогою сферичної оптики. Тому аналіз різних схем обробок виконаємо для такого типу фокусування.

В технології лазерної обробки розрізняють однокоординатне (або лінійне) та двохкоординатне зміцнення.

У випадку лінійного зміцнення швидкість обробки поверхні визначається співвідношенням

$$v = \frac{L}{t} = \frac{nDk_n}{t}, \tag{3.1}$$

де *L* – довжина ділянки, що оброблюється;

t – час обробки;

n – число імпульсів;

D – діаметр ЗЛД;

k_n – коефіцієнт перекриття плям, причому $k_n = \frac{s}{D}$, де *s* – крок зміщення.

Якщо позначити частоту імпульсів ЛВ через *f*, то

$$v = Dk_n f\ . \tag{3.2}$$

Основними параметрами при двохкоординатній обробці є крок *s* відносного переміщення вздовж осі *x* та крок *s′* переміщення вздовж осі *y*. В залежності від співвідношення цих параметрів і буде залежати ступінь упаковки профілю.

Розглянемо основні чотири схеми двохкоординатних обробок (рис. 3.2).

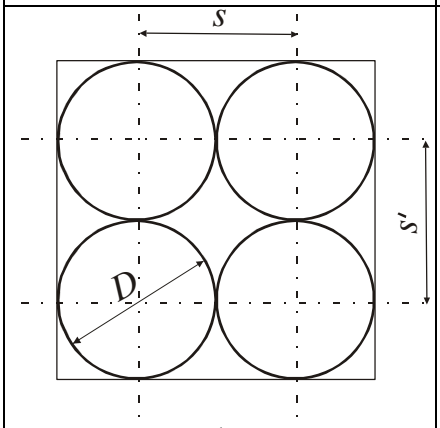
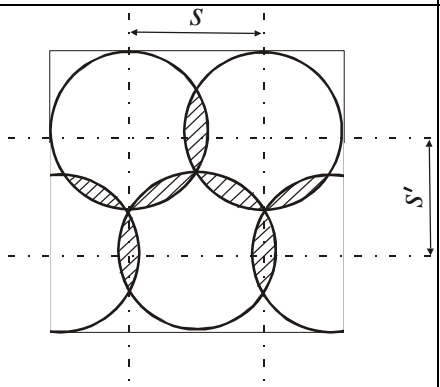
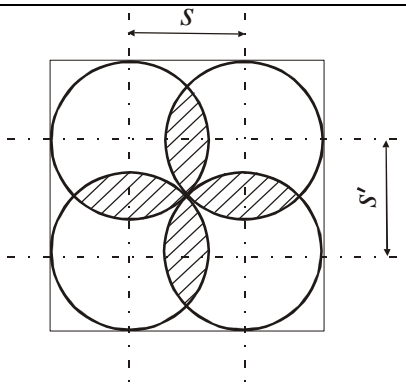
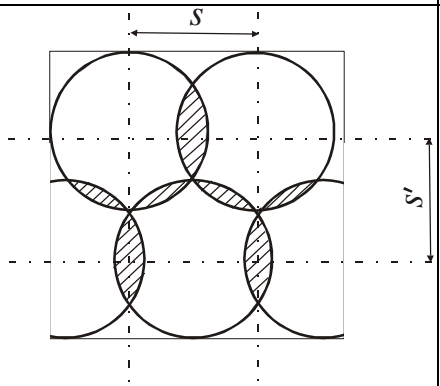
Схема	Характеристика	Схема	Характеристика
 1	$k_n = 1$ $k_в = 0{,}68$ $s = s' = D$	 3	$k_n = 0{,}7$ $s = 0{,}86D$ $s' = 0{,}74D$
 2	$k_n = 0{,}7$ $k_в = 0{,}46$ $s = s' = 0{,}7D$	 4	$k_n = 0{,}7$ $k_в = 0{,}72$ $s = s' =$ $= 0{,}8D$

Рис. 3.2

Оцінка ефективності наведених схем характеризується наступними показниками:

а) коефіцієнтом заповнення профілю $k_з$, який визначає ступінь заповнення профілю зонами лазерної дії; визначається співвідношенням

$$k_з = \frac{F'}{F}, \tag{3.3}$$

де F' - площа опроміненої поверхні;

F - вся площа, яку необхідно опромінити:

б) коефіцієнтом використання імпульсів $k_в$, що являє собою відношення дійсної площі опроміненої поверхні до максимально можливої теоретичної площі опромінення, яка може бути досягнутою тими ж n лазерними імпульсами

$$k_в = \frac{4F'}{n\pi D^2}. \tag{3.4}$$

Розглянемо схему 1. У цьому випадку $s = s' = D$. Така схема обробки використовується тоді, коли експлуатаційні вимоги до деталі припускають наявність неопромінених ділянок. Ця схема характеризується низьким коефіцієнтом заповнення профілю ($k_з = 0{,}8$) і досить високим значенням коефіцієнта використання імпульсів ($k_в = 0{,}68$). Ці параметри обумовлюють досить високу продуктивність обробки. Особлива риса обробки за схемою 1 – відсутність перекриття плям ($k_п = 1$, оскільки $s = D$).

Повне перекриття поверхні, що опромінюється, досягається лише при взаємному перекритті плям (тобто при $k_п < 1$). У всіх випадках обробки необхідно прагнути до того, щоб розміри перекриття плям ЛВ були мінімальними).

У випадку відсутності відносного зміщення центрів зон лазерної дії сусідніх рядів цих умов можна досягнути прим $s = s' = 0{,}7D$. У цій схемі досягається максимальне заповнення профілю ($k_з = 0{,}96$).Проте при цьому коефіцієнт $k_в$ є дуже низьким ($k_в = 0{,}46$), що свідчить про низьку продуктивність. Крім того, при такій схемі обробки розміри перекриття плям є досить значними, що призводить до небажаних ефектів (зниження механічних характеристик внаслідок структурних змін у місцях перекриття).

Останній недолік суттєво зменшується в схемах, що припускають відносне зміщення центрів ЗЛД на величину *s*/2 по горизонталі у сусідніх рядах.

Найбільш прийнятною з технологічної точки зору є схема 4, у якій $s = s'$ (більш простою є наладка обладнання). У цьому випадку ступінь заповнення профілю є майже таким, як і при обробці за схемою 3 ($k_з = 0{,}94$, а за схемою 3 - $k_з = 0{,}95$).

Таким чином оптимальною величиною кроку можна вважати $s = s' = 0{,}8\ D$.

Одним з найважливіших параметрів під час лазерної обробки є ступінь рівномірності розподілу зон лазерної дії за глибиною, тобто товщина шару h з рівномірно зміненими властивостями.

Припустимо, що характер зміни температури в ЗЛД у загальному випадку описується рівнянням параболи

$$x^2 = 2pz, \tag{3.5}$$

де p – параметр параболи.

Тоді у просторі зона лазерної дії може бути представленою у вигляді параболоїду обертання $x^2 + y^2 = 2pz$ з радіусом поперечного перерізу $R = \sqrt{2pz}$.

У випадку, коли лазерна обробка виконується з $k_п < 1$, то глибина рівномірного розподілу двох сусідніх ЗЛД буде визначатися положенням граничної точки В перерізу двох параболоїдів (рис. 3.3).

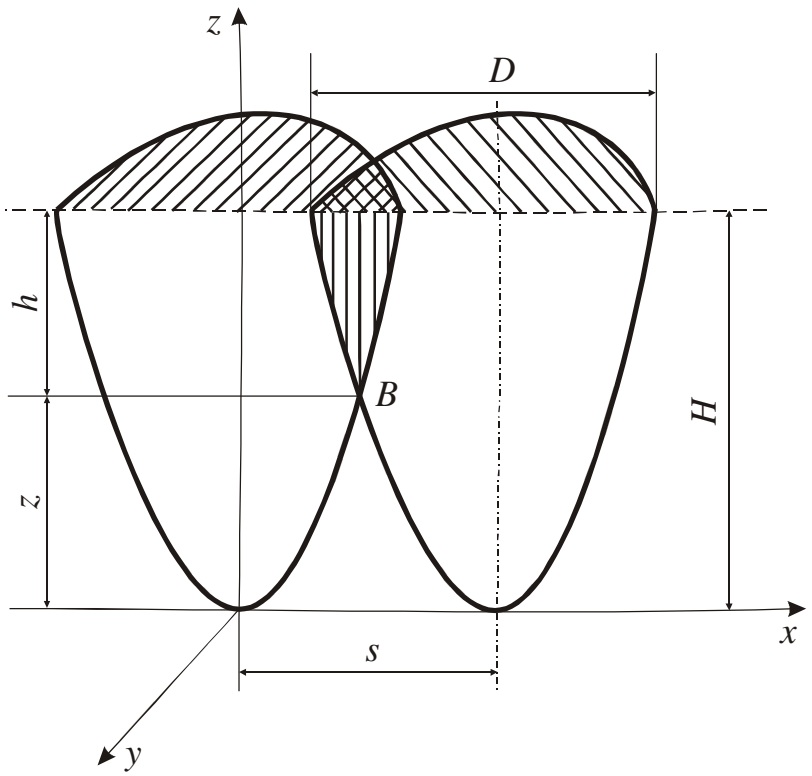


Рис. 3.3

Координата z цієї точки залежить від кроку s обробки і може бути визначеною з розв'язку системи рівнянь для двох параболоїдів, що перетинаються

$$\begin{cases} x^2 + y^2 = 2pz \\ (x-s)^2 + y^2 = 2pz \end{cases}. \tag{3.6}$$

Звідки $x = \frac{1}{2}s$. Підставивши значення x в формулу (3.5), отримаємо

$$z = \frac{s^2}{8p}. \tag{3.7}$$

Оптимальний з точки зору рівномірного розподілу зон лазерної дії за глибиною крок s можна визначити таким чином. Знаючи H та D елементарної ЗЛД, визначають параметр параболи p:

$$p = \frac{R^2}{2H} = \frac{D^2}{8H}. \tag{3.8}$$

Але оскільки на глибині h кола перерізів параболоїдів мають спільну точку B, то крок s визначають за формулою

$$s = \sqrt{8pz} = \sqrt{\frac{(H-h)D^2}{H}}\,. \tag{3.9}$$

Визначаючи залежності для розрахунку оптимізації швидкостей та продуктивності процесу лазерної обробки, необхідно враховувати той факт, що реалізацію двохкоординатної обробки за допомогою імпульсних лазерів зручніше виконувати методом порядко́вого сканування. Для цього необхідно забезпечити зворотно-поступальне відносне переміщення зі швидкістю v або лазерного променя, або поверхні, що оброблюється. Особливістю лазерної обробки за схемами 3 та 4 є те, що сканування відбувається при періодичному зміщенні по осі x центрів ЗЛД кожного наступного рядка відносно відповідних центрів попереднього рядка на пів-кроку, тобто на величину $\frac{s}{2}$.

Визначимо швидкості відносного переміщення променя (чи поверхні) для наведених вище схем обробок.

Схема 1.

Якщо $s = D$, то $v = Df$, де f - частота повторення імпульсів.

Схема 2.

Якщо $s = 0{,}7D$, то $v = 0{,}7Df$.

Схема 3.

Якщо $s = 0{,}86D$, то $v = 0{,}86Df$.

Схема 4.

Якщо $s = 0{,}8D$, то $v = 0{,}8Df$.

При виконанні зміцнення поверхонь за допомогою імпульсної лазерної обробки необхідно відмітити один важливий момент. ***Для ефективного зміцнення (тобто для отримання максимальних розмірних параметрів (особливо глибини h)) матеріали необхідно оброблювати при максимально можливих густинах потужності випромінювання, але при таких, які не перевищують критичних значень для даного матеріалу (тобто при таких густинах потужності, при яких не відбувається руйнування матеріалу).***

Ефективність зміцнення може бути підвищеною за рахунок зростання поглинальної здатності поверхні, яка оброблюється, наприклад, при нанесенні на неї колоїдного розчину графіту або при попередній хімічній обробці поверхні розчином на основі пікринової кислоти, тощо.

Ступінь зміцнення матеріалу у значній мірі залежить як від типу матеріалу, так і від його вихідного стану. Наприклад, при одних і тих же параметрах лазерної обробки для загартованих зразків рівень зміцнення буде вищим, ніж для відпалених.

Як правило обробку за допомогою імпульсного лазера здійснюють з перекриттям ЗЛД. Тому оброблена зона у поздовжньому перерізі (у напрямку руху променя) являє собою характерну “лускоподібну” структуру (рис. 3.4).

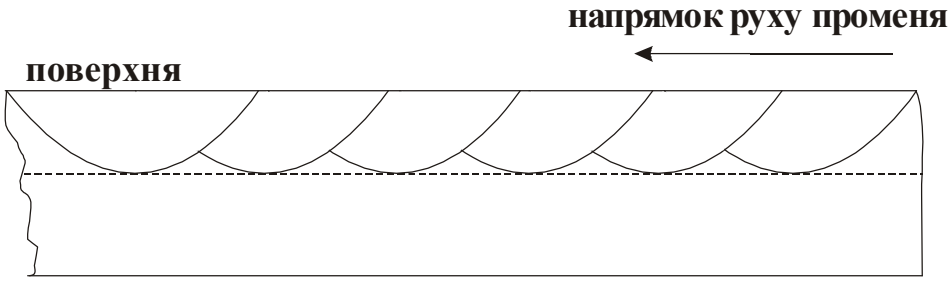


Рис. 3.4

Така форма зони нагрівання пояснюється тим, що при дії кожного наступного імпульсу деяка частка зміцненої зони, отриманої від попереднього імпульсу, нагрівається повторно. При цьому у тій частині зони, де температура перевищувала деяку критичну точку (наприклад, точку A_{c1} для сталі) відбувалася повна фазова перекристалізація, за якою відбувалося повторне гартування). В результаті всього цього частина ЗЛД не відрізняється за структурою від структури нової зони нагрівання, розташованої на рис. 3.4 вліво від даної зони. У тій же частині попередньої зони, де температура повторного нагрівання не перевищувала критичну, відбувався, наприклад для сталі, швидкісний відпуск сформованої раніше мартенситно-аустенітної структури. При такому відпуску внаслідок локального і імпульсного характеру дії ЛВ виникає високодисперсна структура типу троститу, на що вказує значне підвищення здатності даної ділянки зони нагріву до хімічного травлення та її низька мікротвердість.

При наступному імпульсі ЛВ описані процеси повторюються біля лівої межі наступної ЗЛД.

У цьому випадку коефіцієнт перекриття плям k_n є дуже важливою характеристикою, яка визначає співвідношення зміцнених та відпущених ділянок зон лазерної дії.