

Зміцнення поверхонь неперервним лазерним випромінюванням

Використання неперервного лазерного випромінювання суттєво розширює можливості процесу зміцнення. Значно підвищується продуктивність обробки. Це дозволяє виконувати обробку більш габаритних деталей або ділянок. Технологічні характеристики, як і при обробці імпульсним ЛВ, залежать від схем обробки, властивостей матеріалу, який обробляється, енергетичних параметрів, швидкості обробки.

4.1. Схеми обробки

Існують чотири основні схеми зміцнення неперервним ЛВ (рис. 4.1).

Перша схема (одноріжкове зміцнення) є варіантом однокоординатної обробки. Вона подібна до лінійного зміцнення при імпульсній лазерній обробці і використовується при значній протяжності та малій ширині робочої поверхні, яку необхідно зміцнити. Доріжка зміцнення у цьому випадку в залежності від траєкторії переміщення променя чи деталі може мати різну конфігурацію.

Продуктивність Π обробки, яка виконується за схемою 1, визначається за допомогою співвідношення

$$\Pi = vB, \quad (4.1)$$

де v – швидкість відносного переміщення променя та матеріалу, який оброблюється (так звана **швидкість обробки**);

B – ширина доріжки зміцнення.

Друга схема також являє собою варіант однокоординатної обробки. Згідно цієї схеми на поверхні отримують декілька доріжок зміцнення (без їх взаємного перекриття). При цьому конфігурація доріжок залежить від траєкторії взаємного переміщення променя та поверхні, що оброблюється. У випадку послідовного отримання окремих доріжок продуктивність Π зміцнення визначається за формулою (4.1). Якщо ж паралельно наносяться декілька доріжок, то продуктивність визначається із співвідношення

$$\Pi = vBn, \quad (4.2)$$

де n – кількість доріжок зміцнення.

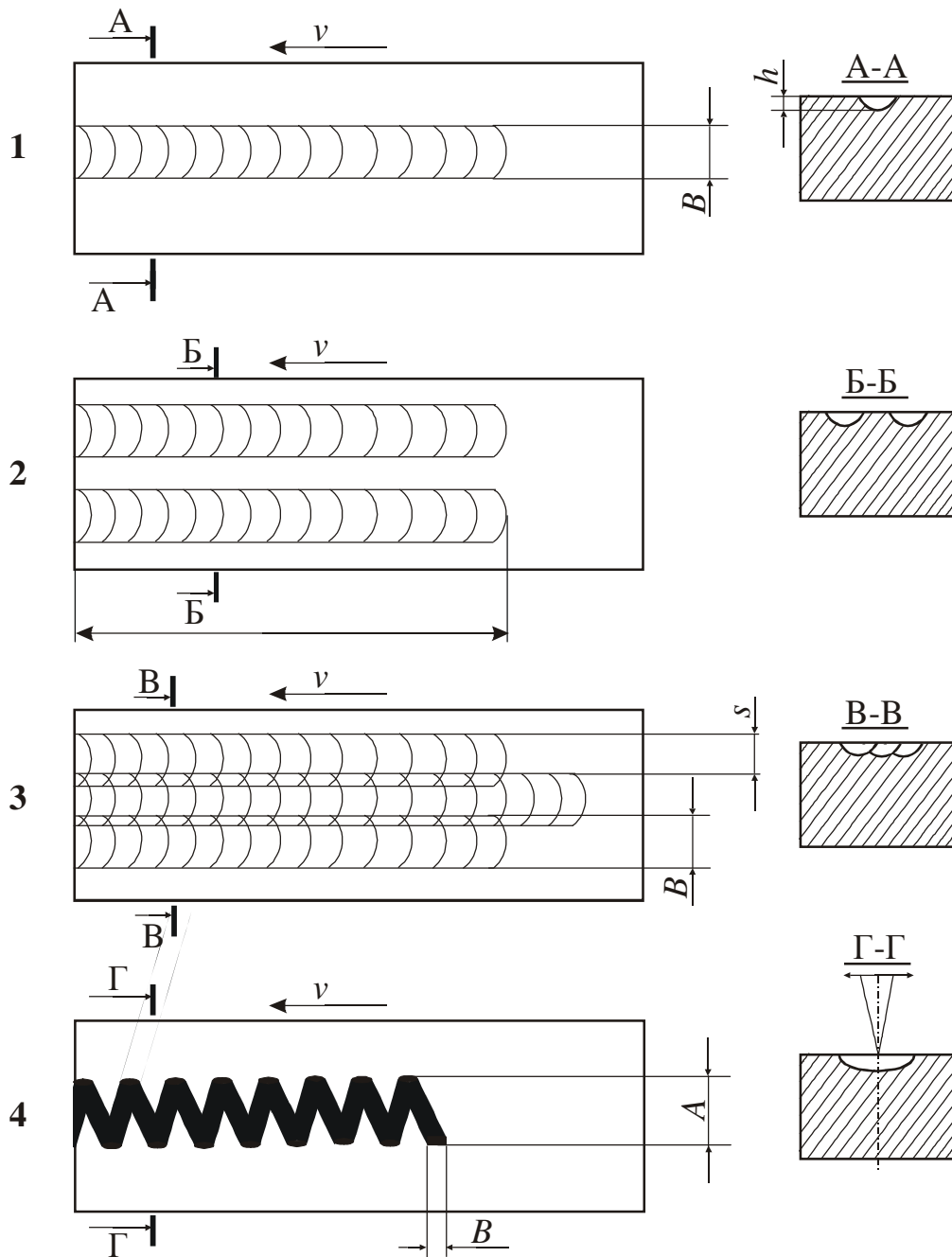


Рис. 4.1.

Третя схема. Згідно цієї схеми доріжки зміцнення отримують при їх взаємному перекритті. Друга та третя схеми використовуються для зміцнення значних ділянок поверхні. При обробці за третьою схемою продуктивність Π зміцнення визначається за формулою

$$\Pi = vBk_n, \quad (4.3)$$

де k_n - коефіцієнт перекриття; $k_n = \frac{s}{B}$; s – крок обробки.

Четверта схема. Обробка здійснюється при скануванні випромінювання (або поверхні, яка зміцнюється) чи суміщення коливання випромінювання з амплітудою A і перпендикулярного до нього переміщення поверхні. У цьому випадку продуктивність P обробки визначається за формулою

$$P = vA. \quad (4.4)$$

Ця схема дає можливість виконувати обробку значних площ поверхні на незначну глибину.

Для всіх розглянутих схем обробка поверхні звичайно здійснюється за допомогою потужного неперервного випромінювання CO₂-лазерів у інфрачервоному діапазоні. Фокусування такого випромінювання проводять за допомогою сферичної оптики (лінзи NaCl, KCl, GaAs, ZnSe).

При неперервній лазерній обробці основними (як і у випадку імпульсної обробки) є розмірні параметри: ширина доріжки, площа зміцненої зони, глибина зміцнення. Крім того важливу роль відіграють: ступінь зміцнення та шорсткість обробленої поверхні. Всі зазначені параметри залежать від густини потужності випромінювання, швидкості обробки, виду матеріалу, а також від поглинальної здатності поверхні та геометрії виробу, який оброблюється (тобто від умов відводу тепла).

Якщо розглянути поперечний переріз доріжки неперервного лазерного зміцнення, то зона термічного впливу буде являти собою характерну сегментоподібну форму (рис. 4.2).

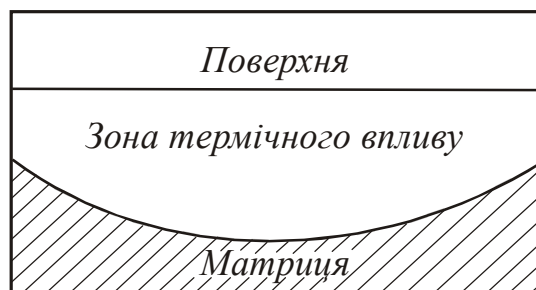


Рис. 4.2

Переріз складається, як правило, з декількох шарів, кількість яких визначається режимами обробки. Причому, в центральній частині зони термічного впливу спостерігається характерний для надшвидкісного нагрівання та охолодження так званий “білий шар”, а на периферії – перехідний шар.

Як приклад, розглянемо обробку сталі 35 при швидкостях нагрівання від 0,6 до 1,8 м/хв.

Перший шар (“білий”) відмічається лише при швидкості 1,8 м/хв. Він має високу твердість (~ 8000 МПа), яка в чотири рази перевищує мікротвердість сталі у вихідному стані та є на 1500 МПа вищою, ніж після звичайного

гартування. Мікроструктура “білого шару” – це мартенсит з незначною кількістю залишкового аустеніту. Причому, мартенсит характеризується підвищеною (в 1,5-2 рази) дисперсністю порівняно зі звичайним гартуванням.

Мікротвердість другого шару є нижчою, порівняно з першим. Розміри мартенситних голок у цьому шарі є в 2-4 рази меншими, ніж у “білому шарі”. Твердість другого шару та його мікроструктура є подібними до твердості та структури сталі після звичайного гартування.

В третьому шарі відбувається неповне гартування сталі. Він складається з мартенситу, троститу та фериту. Проте і в цьому шарі твердість перевищує твердість вихідного матеріалу у 1,5 рази.

Четвертий шар, який межує з матрицею, також був підданий неповному гартуванню, проте має максимальну твердість (до 9000 МПа), оскільки мартенситні перетворення в ньому внаслідок швидкого відводу тепла в матрицю відбуваються з максимальною швидкістю. У цьому шарі майже в 3-5 разів більше фериту, ніж у третьому.

При зростанні швидкості обробки до 2,2-2,4 м/хв. “білий шар” не утворюється і зона термічного впливу вміщує лише три шари. Подальше зростання швидкості до 3 м/хв. Призводить до утворення лише одного шару, структура якого є подібною до четвертого шару і складається з мартенситу та фериту.

Зі зростанням густини потужності випромінювання підвищується глибина зона термічного впливу, а ширина, навпаки, зменшується. У цьому випадку зростання глибини зони викликається підвищенням питомої енергії, що підводиться, а зменшення ширини – зниженням ступеня дефокусування променя.

Зростання густини потужності до $5 \cdot 10^4$ Вт/см² і більше призводить до деякого зменшення глибини зони термічного впливу. Це пов'язано зі зростанням кількості енергії на процес плавлення сталі. Крім того, про початок часткового оплавлення матеріалу свідчить і зростання параметрів шорсткості поверхні.

Розмірні параметри зміцнення у значній мірі залежать від швидкості обробки. Так, при підвищенні швидкості знижується як глибина, так і ширина зони термічного впливу. Пояснення просте – зменшується питома енергія випромінювання, що підводиться до зони.

Якість зміцнення визначається такими важливими технологічними параметрами, як шорсткість зміцненої поверхні та її мікротвердість. Доріжка лазерної дії у поперечному перерізі має форму піка, розміри якого залежать від режимів обробки. З обох боків від підвищення сліду розташовуються поглиблення, причому їх сумарний об'єм є значно меншим, ніж об'єм підвищення. Це пояснюється зростанням об'єму матеріалу при мартенситних перетвореннях. При зниженні густини потужності випромінювання зростає ширина перерізу профілю, що пов'язано зі зростанням ступеня дефокусування променя. Висота сліду H_{\max} також залежить від густини потужності. При $q = 10^4$ Вт/см² помітного плавлення матеріалу ще не відбувається, тому шорсткість обробленої поверхні практично не відрізняється від вихідної. При

зростанні густини потужності H_{\max} спочатку різко підвищується і виходить на насичення при $q = 5 \cdot 10^4$ Вт/см². Потім поступово знижується. Характер залежності шорсткості (параметр R_z) від густини потужності має приблизно такий же вигляд, як і $H_{\max}(q)$.

Значний вплив на шорсткість має швидкість зміцнення v . При низьких значеннях v параметри R_z та H_{\max} досягають найвищих значень (вимірювання проводились при густині потужності випромінювання $q = 2 \cdot 10^4$ Вт/см²). Зі зростанням v параметри R_z та H_{\max} поступово знижуються (за приблизно однаковими закономірностями) до значень швидкості $v \sim 3$ м/хв. При $v > 3$ м/хв спостерігалось різке зниження H_{\max} і наближення його значень до R_z . А при $v = 6$ м/хв величини R_z та H_{\max} приблизно дорівнювали значенню шорсткості матеріалу у вихідному стані.

Аналіз профілограф, знятих вздовж сліду лазерної дії при різних значеннях швидкості обробки показав, що мікронерівності не мали різких переходів. З точки зору експлуатаційних вимог до поверхні, що зміцнюється, - це є позитивним фактом, причому цей факт у більшій чи меншій мірі є характерним для усіх схем обробок. Лише у випадку виконання обробки за схемою три проявлялись деякі специфічні особливості. Наприклад, зміцнена зона у поперечному перерізі мала "лускоподібну" структуру, як і у випадку імпульсної лазерної обробки. Це призводило до утворення ділянок відпуску між сусідніми областями з підвищеною твердістю. Ділянки відпуску фактично не залежали від кроку s та коефіцієнта перекриття k_n і мали однакові розміри, у той час як розміри зміцнених ділянок зі зростанням k_n також зростали.

Деякі особливості існують і при реалізації четвертої схеми обробки. У цьому випадку частота коливань променя f та швидкість v відносного переміщення променя та матеріалу повинні бути такими, щоб на всю оброблювану ділянку діяв практично неперервний тепловий потік. При цьому температура даної ділянки на поверхні повинна бути дещо вищою від критичної точки T_n і нижчою від точки плавлення T_{nl} . Час же нагрівання (загальний), який визначається частотою f та швидкістю v , повинен бути таким, щоб забезпечувалось досить ефективно самоохолодження зони термічного впливу. У випадку недостатньої густини потужності випромінювання чи високої швидкості v температур нора у поверхневому шарі не досягне критичного значення T_n , а тому і бажаних структурних перетворень не відбудеться.

Якщо сильно підвищити густину потужності променя, або значно знизити швидкість сканування v , то температура поверхні може перевищити T_{nl} , що, в свою чергу, відразу ж призведе до зміни вихідної шорсткості поверхні. Тому для кожного значення густини потужності швидкість обробки повинна мати строго визначене оптимальне значення.

Обробка за четвертою схемою дає можливість отримання смуг значної ширини (у цьому випадку зона термічного впливу буде дорівнювати амплітуді

коливань променя). При цьому зміцнений шар має однорідну структуру, рівномірну глибину та не вміщує небажаних зон відпуску (як при обробці з перекриттям).

У таблиці 4.1 наведені характеристики зміцнених зон для різних сталей при $f = 6000$ Гц.

Таблиця 4.1

Матеріал	P, квт	v , м/хв	Розміри зони		H_{μ} , МПа	
			$B = A$, мм	h , мм	Незміцнена ділянка	Зміцнена ділянка
Ст3	3,6	0,48	17	1,0	3000	6500
40X	3,6	0,48	17	1,0	3220	8240
75Г	3,6	0,48	17	1,0	3700	10500
Чавун КЧ35-10	3,5	0,39	30	0,3	1900	10000

При обробці поверхні деталі неперервним ЛВ спостерігається інтенсивний теплопідвід до неї. Ефект зміцнення досягається завдяки автогартуванню, тобто самоохолодженню матеріалу при швидкому відведенні поглиненої теплоти вглиб матриці. У цьому випадку необхідно знати граничні значення товщини матеріалу δ_{zp} , вище від яких можна не враховувати кінцевих розмірів виробу. Згідно розрахункових і експериментальних даних підвищення товщини матеріалу δ призводить до зниження глибини зони термічного впливу. Проте, починаючи з деякого значення δ , при постійних умовах випромінювання глибина h зони залишається практично постійною. Цей факт пояснюється тим, що з підвищенням товщини матеріалу, який обробляється, нижня його межа (що не нагрівається) все менше й менше впливає на формування теплового стану поблизу джерела нагрівання. Така товщина виробу, при якій h припиняє змінюватися і вважається граничною (δ_{zp}).

Товщина деталі досить сильно впливає і на мікротвердість структури, що отримується. Характер залежності мікротвердості від товщини деталі $H_{\mu} = H_{\mu}(\delta)$ корелює із залежністю $h = h(\delta)$. Крива $H_{\mu}(\delta)$ має три чітко виражених ділянки (рис. 4.3). Перша ділянка (з низькими значеннями мікротвердості) є характерною для тонких, оброблених лазером виробів, друга (з підвищеними значеннями H_{μ}) – для виробів, товщину яких можна співставити з граничною, а третя (з максимальною мікротвердістю) – для деталей, товщина яких перевищує δ_{zp} . Такий характер залежності $H_{\mu}(\delta)$ обумовлюється різницею у швидкостях нагрівання та охолодження виробу під час обробки.

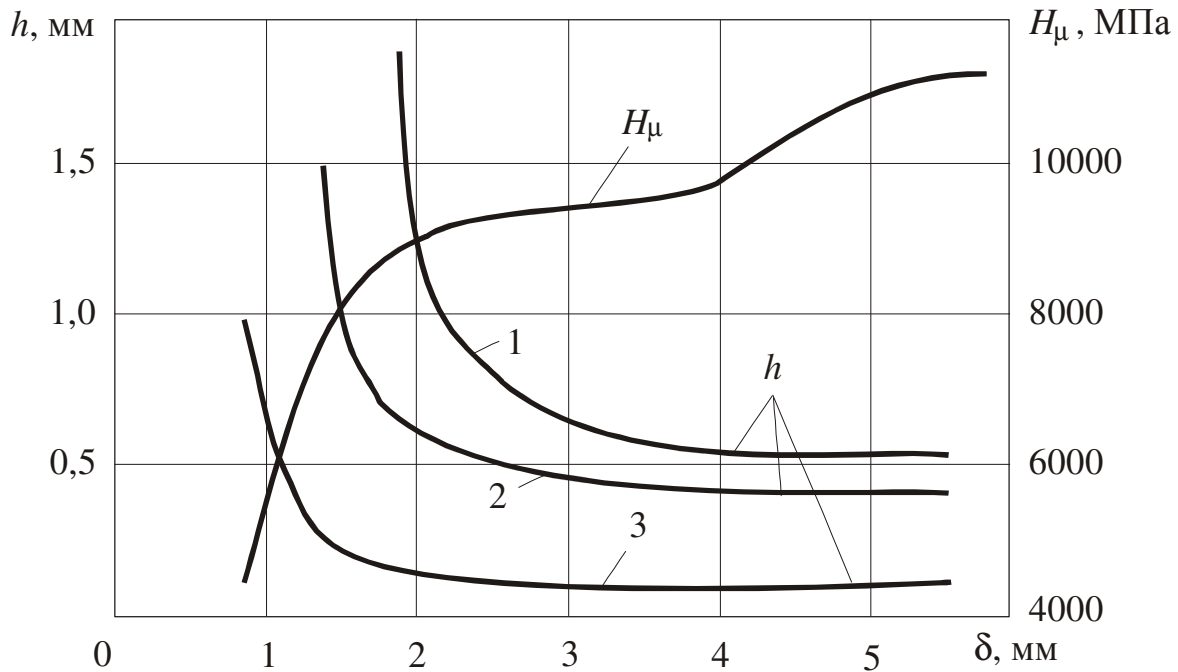


Рис. 4.3 Залежність глибини h та мікротвердості H_{μ} зони термічного впливу від товщини матеріалу δ при різних швидкостях обробки, м/хв.:
1 – 0,26; 2 – 0,48; 3 – 1,00

Окрім усіх зазначених факторів необхідно відзначити, що ефективність зміцнення неперервним ЛВ залежить також і від характеристик поглинаючого покриття.

На сьогодні існують такі види поглинаючих покриттів, як фосфатування, кадмування, оксидування, хромування, нанесення колоїдного розчину графіту, різноманітних фарб, напилювання, тощо. Для порівняльної оцінки покриттів часто користуються так званим критерієм ефективності поглинання $\eta = \frac{h_n}{h_{\delta n}}$, де h_n та $h_{\delta n}$ - глибина зони термічного впливу відповідно з покриттям та без покриття. Шкала ефективності покриттів може бути представленою у вигляді таблиці 4.2.

Як видно з таблиці найкращу поглинальну здатність забезпечує оксидування (Fe_3O_4). Приблизно такими ж властивостями характеризуються покриття SiO_2 , Al_2O_3 . Окрім того, використання покриття Al_2O_3 при обробці в режимі слабого оплавлення поверхні призводить до того, що оксид алюмінію втілюється до матричного складу, підвищуючи його зносостійкість. Нанесення цих покриттів не є важкою задачею і досить легко вписується у технологічний цикл (розпилення, пірнання, намазування пензлем, тощо). Поглинальні властивості таких покриттів практично не залежать від хімічного складу матеріалів, які обробляються.

Таблиця 4.2

Покриття	η
Cr	0,6
Без покриття	1
Cd	2
C	3
ZnO	4,5
Zn ₃ (PO ₄) ₂	5,1
SiO ₂ , Al ₂ O ₃	6,5
Fe ₃ O ₄	6,7

Важливим фактором забезпечення якісного зміцнення є товщина покриття. Оптимальною вважається товщина 20 ÷ 50 мкм. Дуже тонкі покриття знижують глибину зміцнення внаслідок їх швидкого випаровування, а підвищення товщини може призвести до значної неоднорідності результатів обробки.