

## Лазерне зварювання

За допомогою лазерного випромінювання в зоні лазерної дії можуть досягатися температури, які є достатніми для інтенсивного плавлення матеріалу. Можливість швидкого плавлення, а також локалізація теплових процесів дали можливість для використання лазерного випромінювання для зварювання матеріалів. За допомогою лазера можна виконувати два види зварювання – точкове та шовне. Точкове зварювання можна виконувати практично завжди лише за допомогою імпульсного лазерного випромінювання. Шовне ж зварювання виконується як за допомогою імпульсного, так і неперервного лазерного випромінювання.

Розглянемо ці два види зварювання.

### 6.1 Точкове зварювання

Початкового використання лазерне зварювання набуло при виконанні з'єднань у електроніці та приладобудуванні (зварювання контактів, термопар, тощо).

За допомогою цього виду зварювання з'єднуються тонкі листові матеріали (0,5 – 2 мм), дріт діаметром 10 – 500 мкм, дріт та підкладинка, тонкі листи і масивні матеріали (рис. 6.1).

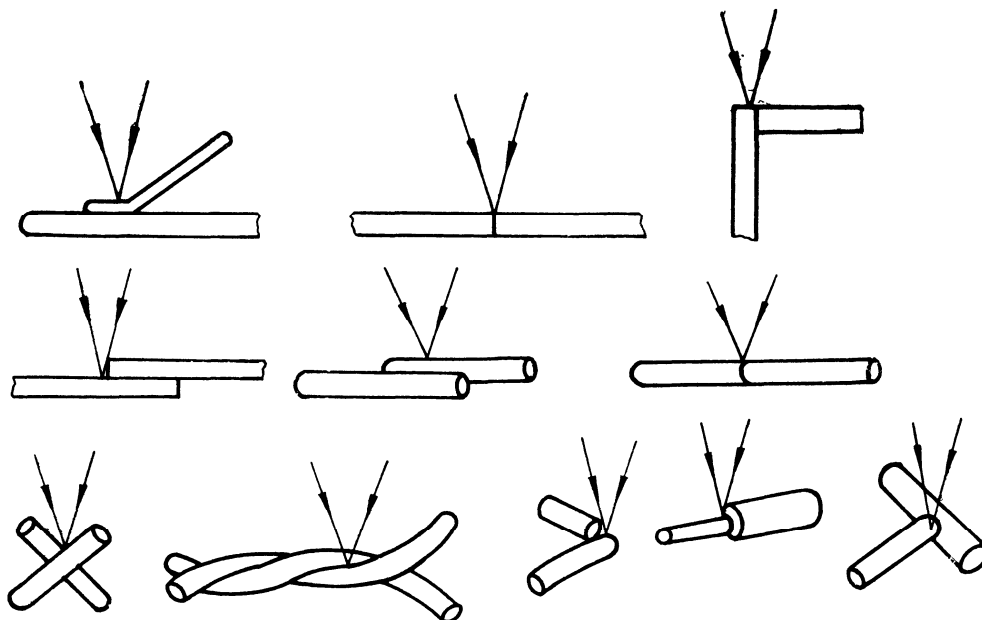


Рис. 6.1

За допомогою імпульсного лазерного випромінювання можна отримати зону розплавленого матеріалу заданих розмірів. Основними характеристиками, що визначають можливості процесу лазерного зварювання, внаслідок цього є розмірні параметри зварювальної ванни, якість зварного з'єднання, продуктивність процесу. На ці характеристики значний вплив мають густина потужності випромінювання, тривалість та енергія імпульсу, форма імпульсу, а також фізичні властивості матеріалів, що зварюються.

Міцність зварного з'єднання визначають глибина зварювальної ванни і діаметр проплавлення, які залежать від енергії, затраченої на нагрівання, часу та густини потужності лазерного випромінювання. При підвищенні енергії  $E$  глибина  $H$  і діаметр  $D$  ванни зростають. Проте для різних матеріалів розмірні параметри ванни будуть різними, що пояснюється неоднаковістю теплофізичних характеристик оброблюваних матеріалів. Для добрих провідників тепла (наприклад, міді) параметри будуть більшими, а для нікелю та молібдену (з більш низькою теплопровідністю) глибина та діаметр проплавлення будуть меншими.

Розмірні параметри зони розплавлення залежать від тривалості імпульсу. Для кожного матеріалу існує оптимальний діапазон тривалості імпульсу, при якому зварне з'єднання отримується без випаровування поверхні. Проте тривалість імпульсу не є лише одним критичним параметром, оскільки вона пов'язана з густиною потужності випромінювання. Наприклад, при імпульсному лазерному зварюванні, з одного боку, густина потужності повинна бути вищою від деякого певного значення, при якому за час дії імпульсу  $\tau$  на поверхні досягається температура  $T_{nl}$ . З іншого боку, значення густини потужності не повинно перевищувати таке, при якому починається інтенсивне випаровування з поверхні розплаву:

$$q_{nl} \leq q < q_n. \quad (6.1)$$

Коли густина потужності відповідає значенню  $q_n$ , поверхня матеріалу, що оброблюється, починає випаровуватися раніше, ніж значна кількість тепла розповсюдиться вглиб матеріалу. Внаслідок цього розташовані нижче шари матеріалу, який зварюється, не будуть змінюватися. Але по мірі випаровування верхніх шарів почнеться випаровування й більш глибоких шарів, що призведе до утворення отвору, викликаного випаровуванням матеріалу.

Якщо ж густина потужності не є високою, то температура випаровування досягнеться на поверхні лише через декілька мілісекунд. І температура в глибині матеріалу  $T_n$  перевищить  $T_{nl}$  ще до того, як на поверхні почнеться випаровування. Якщо в цей момент часу перервати подання енергії, то отримається зварювальна ванна певних розмірів.

Таким чином, на процес формування розплавленої ділянки матеріалу і на розмірні параметри розплавленої ванни в основному впливають тривалість імпульсу та густина потужності лазерного випромінювання.

Міцність розплавленої зони та її розмірні параметри визначають якість зварного з'єднання. Однією з найбільших переваг лазерного зварювання перед іншими видами зварювання є незначні розміри зони термічного впливу.

Якість зварювання залежить від багатьох факторів, одним з яких є тип матеріалів, що зварюються. За допомогою лазерного випромінювання можуть бути виконані такі з'єднання матеріалів, які іншими, традиційними методами, виконати неможливо. Проте якісному зварюванню піддаються не всі метали. Якщо використати 10-бальну систему, при якій 10 балів характеризують найвищу якість зварювання, яка відповідає з'єднанню однойменних матеріалів, а 1 бал – найгіршу якість, то ефективність зварювання різномірних металів один з одним можна оцінити з таблиці 6.1.

Таблиця 6.1

Метал	Ag	Al	Cr	Cu	Fe	Mo	Ni	Pd	Pt	Sn	Ta	Ti	W
Ag	10	5	1	4	2	1	1	9	4	1	1	4	1
Al	5	10	1	1	1	1	4	1	1	1	1	4	1
Cr	1	1	10	1	9	9	8	6	7	1	1	7	9
Cu	4	4	1	10	4	1	9	8	8	1	1	4	1
Fe	2	4	9	4	10	7	7	6	6	1	4	4	1
Mo	1	1	9	1	7	10	4	6	6	1	9	9	9
Ni	1	4	8	9	7	4	10	8	8	1	7	4	3
Pd	9	1	6	8	6	6	8	10	8	3	6	3	3
Pt	4	1	7	8	6	6	8	8	10	4	4	3	6
Sn	1	1	1	1	1	1	1	3	4	10	1	1	1
Ta	1	1	1	1	4	9	7	6	4	1	10	9	9
Ti	4	4	7	4	4	9	4	3	3	1	9	10	3
W	1	1	9	1	4	9	3	3	6	1	9	3	10

Якість зварного з'єднання підвищується при зростанні тривалості дії лазерного випромінювання. Це відбувається за рахунок більш повного видалення із розплавленої ванни нерозчинних газів, що понижує можливість утворення пор при остиганні металу.

Міцність з'єднання буде залежати від величини зазору між компонентами, що зварюються. Зі зростанням зазору  $\delta$  міцність з'єднання буди спадати.

## ПРОВЕДЕННЯ ЕКСКУРСІЇ І ВИКОНАННЯ ТОЧКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ НА ЛАЗЕРІ “КВАНТ – 12”

## 6.2 Шовне зварювання

Шовне зварювання використовується не лише у випадку забезпечення надійного контакту зварюваних елементів, але й для досягнення високої герметичності деталей, що з'єднуються. Таке зварювання може виконуватися як за допомогою імпульсного, з високою частотою слідування імпульсів, так і за допомогою неперервного лазерного випромінювання.

Різні типи з'єднання деталей за допомогою шовного зварювання показані на рис. 6.2.

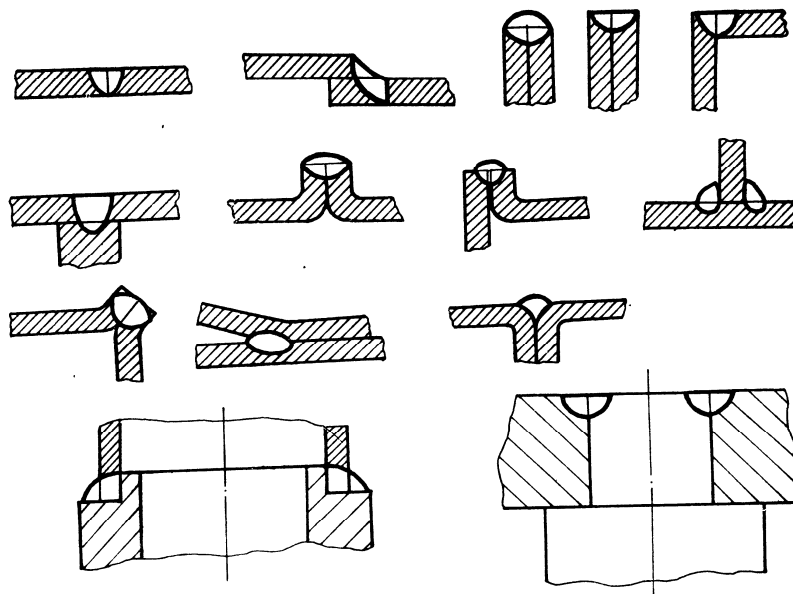


Рис. 6.2

### 6.2.1 Шовне зварювання за допомогою імпульсного лазерного випромінювання

Таке зварювання здійснюється за схемою лінійного зміцнення, але з більш високою густиною потужності випромінювання, яка забезпечувала б проплавлення матеріалу.

У цьому випадку швидкість зварювання  $v$  залежить від розмірів елементарної зони лазерної дії (тобто діаметра ванни  $D$  від одиничного імпульсу), коефіцієнта перекриття  $k_n$  та частоти слідування імпульсів  $f$ :

$$v = Dk_n f, \quad (7.1)$$

де  $k_n = \frac{s}{D}$ ,  $s$  - крок обробки.

Величина  $k_n$  може змінюватися від 0,3 до 0,9. Для високої герметичності з'єднання вибирають, як правило,  $k_n \leq 0,5$ .

Якщо середня потужність в імпульсі складає 100 – 200 Вт, частота слідування імпульсів 20 – 50 Гц, глибина проплавлення близько 300 мкм, то шовне зварювання може відбуватися зі швидкістю до 1 – 1,5 м/хв. При цьому і швидкість, і глибина зварювання будуть залежати від властивостей матеріалів, що зварюються.

При зварюванні імпульсним лазерним випромінюванням необхідно враховувати, що зі зростанням енергії випромінювання в одиничному імпульсі в сучасних лазерах різко знижується частота слідування імпульсів.

Щоб підвищити продуктивність процесу, використовують фокусування променя за допомогою не сферичної оптики у круглу пляму, а циліндричної оптики в прямокутну або овальну пляму з рівномірним розподілом енергії за поперечним перерізом променя. При цьому продуктивність може бути підвищеною у 2 – 4 рази. Тоді швидкість процесу визначається співвідношенням

$$v = f[l - b(1 - k_n)], \quad (7.2)$$

де  $l$  - довжина лазерної плями;

$b$  - ширина лазерної плями;

$k_n$  - коефіцієнт перекриття.

Вибір режимів шовного зварювання імпульсним лазерним випромінюванням здійснюється таким же чином, як і при точковому зварюванні.

### **6.2.2 Шовне зварювання за допомогою неперервного лазерного випромінювання**

Цей вид лазерного зварювання виник із введенням в експлуатацію потужних CO<sub>2</sub>-лазерів. У випадку, коли рівень потужності неперервного випромінювання не перевищує 1 – 1,5 кВт, то основним механізмом передачі тепла вглиб матеріалу є теплопровідність. Тому глибина розповсюдження теплової енергії обмежується цим механізмом і товщина зварного шва, в залежності від часу дії випромінювання, буде знаходитися в межах 1 – 2 мм.

Якщо потужність випромінювання перевищує декілька кіловат, то енергія на поверхню подається швидше, ніж її можна відвести за допомогою механізму теплопровідності. За рахунок випаровування (внаслідок цього) в матеріалі прошивається отвір, через який енергія випромінювання подається вглиб матеріалу. У цьому випадку стає можливим подання енергії на більшу глибину, ніж це було б можливим завдяки механізму теплопровідності. Реалізується так зване “кінджальне” проплавлення, оскільки в перерізі зварювальна ванна має форму загостреного клинка. При відносному переміщенні випромінювання і оброблюваного матеріалу переміщується і отриманий отвір, який потім заповнюється розплавом.

Такий механізм дає можливість виконувати зварювання з глибоким проплавленням. При “кинджальному” проплавленні в умовах дії потужного лазеру відношення глибини проплавлення до ширини шва може досягати 10 і вище, тоді як при передачі тепла в матеріал лише за рахунок теплопровідності це відношення дорівнює приблизно 1 – 2.

Шовне зварювання неперервним лазерним випромінюванням може бути охарактеризована такими параметрами: розмірами, якістю з'єднання і продуктивністю (або швидкістю) обробки. Ці параметри залежать від потужності неперервного лазерного випромінювання, умов фокусування, середовища, в якому відбувається обробка, тощо. Розміри шва, зокрема глибина проплавлення, визначаються, в основному, потужністю випромінювання. При низьких потужностях лазерного випромінювання глибина змінюється слабо.

1. **Демонстрація:** результати досліджень імпульсного лазерного зварювання різнорідних сплавів.

**Статті:**

1. Брехаря Г.П., Гиржон В.В., Данильченко В.Е. Лазерная сварка разнородных сплавов // Технология и организация производства. - 1991. - № 2. - С. 12 - 14.
2. Брехаря Г.П., Гиржон В.В., Данильченко В.Е. Особенности структуры лазерного шва разнородных металлов // Физика и химия обработки материалов. - 1991. - № 3. - С. 116 - 120.