

**Конспект лекцій з курсу**  
***Лазерна індустріальна та мікро -***  
***технологія***

## Класифікація квантових приладів та їх застосування

Розрізняють наступні типи квантових приладів:

- квантові стандарти довжини , частоти , часу;
- квантові підсилювачі ;
- лазери – оптичні квантові генератори(ОКГ);
- перетворювачі частоти лазерного випромінювання;
- лазерні модуляційні пристрої;
- лазерні системи(системи з декількох лазерів: гірометри , системи, що застосовуються в оптичному зв'язку);
- лазерні технологічні методи і обладнання.

Лазери можна класифікувати за 3-ма ознаками:

- 1) спосіб накачки (оптична, хімічна, ядерна, ...);
- 2) тип активного середовища (твердо тільні, газові, атомарні, рідинні, напівпровідникові);
- 3) режим роботи (неперервний, імпульсний).

Через відмінність в режимі роботи лазери поділяють на два блоки:

- блок 1 – лазери, які працюють в неперервному режимі і відповідно видають одномодове монохроматичне випромінювання;
- блок 2 – лазери, які працюють в імпульсному режимі.

Лазери, які відносяться до блоку 1, використовуються в тих галузях, в яких необхідною є висока густина енергії (потужність): лазерна технологія, керований термоядерний синтез, керовані хімічні реакції, променева передача енергії, лазерна зброя, розділення ізотопів, ...

Лазери блоку 2 використовуються в галузях, де вирішальними є властивості когерентності та монохроматичності лазерного випромінювання: дальнометрія, наведення і керування лазерним променем, геодезія, будівництво, світло – локації, лазерні системи передачі інформації, голографічні системи розпізнавання образів, запису та обробки інформації,

інтегральна оптика, лазерна інтерферометрія та метрологія, контроль забруднення середовища, біологія та медицина, ...

Виділяють наступні загальні переваги лазерної технології:

- 1) Відсутність механічного впливу при обробці з боку інструменту на оброблювану деталь; це дозволяє обробляти тонкі мініатюрні вироби, що легко деформуються без небезпеки їх пошкодження. Ця перевага дає можливість відмовитись від складних і металоємних заживних пристроїв і пристосувань для закріплення заготовок.
- 2) Висока локалізація (сфокусованість) лазерного випромінювання на матеріалі, дозволяє виконувати унікальні операції мікрообробки, що не можуть бути виконані іншими технологічними методами.
- 3) Здатність лазерного випромінювання проводити обробку крізь, прозору для даної довжини хвилі випромінювання  $\lambda$ , оболонку. Така здатність лазерного випромінювання дозволяє проводити обробку в замкнених об'ємах, без порушення цілісності оболонки.
- 4) Завдяки певній «гнучкості» лазерного випромінювання – як інструмента яким обробляють, можливості порівняно легкої зміни його положення в просторі, без складних металоємних пристроїв, можна проводити обробку у важкодоступних та не доступних для звичайного інструменту місцях.
- 5) Безінерційність при переміщенні лазерного випромінювання відносно заготовки, можливість неперервної та дискретної подачі енергії в зону обробки, дозволяє значно підвищити продуктивність технологічних операцій.
- 6) Можливість керування температурою в зоні лазерного впливу в зоні лазерного впливу(змінюючи потужність) дозволяє обробляти лазерним випромінюванням будь-який матеріал, створює передумови для заміни різноманітних дефіцитних високолегованих сталей і сплавів на менш дефіцитні матеріали та ширше використовувати неметалеві(керамічні чи композиційні)матеріали.

- 7) При розробці технологічних процесів лазерної обробки матеріалів, лазерне випромінювання слугує не тільки як оброблюючий інструмент, але й одночасно несе інформацію про хід процесу обробки, про розмірні та інші параметри зони обробки, що дозволяє повністю автоматизувати технологічний процес.
- 8) Використання лазерної технології дозволяє суттєво збільшити точність, якість, надійність та довговічність деталей та інструментів; дає можливість надати оброблюваним виробам нових експлуатаційних якостей.
- 9) Відносна безпечність використання лазерного випромінювання для технологічних цілей, вигідно відрізняє цю технологію від багатьох інших (де потребується вакуумне середовище).

#### Техніка безпеки при роботі з технологічними лазерами.

##### Особливості експлуатації

Існує наступна класифікація лазерів за ступенем небезпечності генерованого ними випромінювання:

- Клас 1 – повністю безпечні: вихідне випромінювання даного класу лазерів, не представляє собою небезпеки при опроміненні очей та шкіри.
- Клас 2 – лазери, вихідне випромінювання яких є небезпечним при опроміненні очей та шкіри людини колімованим (напрямленим) пучком променів; дифузне відбите випромінювання є безпечним.
- Клас 3 – лазери, вихідне випромінювання яких є небезпечним при опроміненні очей не тільки колімованим, але й дифузно-відбитим випромінюванням на відстані 10 см від поверхні, яка розсіює і при опроміненні шкіри колімованим пучком. Дифузно-відбите випромінювання є безпечним для шкіри.
- Клас 4 – лазери, дифузно-відбите випромінювання яких є небезпечним для шкіри і очей.

Правила техніки безпеки встановлюють:

- 1) граничнодопустимі рівні лазерного випромінювання діапазонів довжин хвиль  $180 \div 1 * 10^5$  нм при різних умовах впливу на людину;
- 2) класифікацію лазерів за ступенями небезпеки генерованого ними випромінювання;
- 3) вимоги до експлуатації лазерів;
- 4) вимоги до виробничих приміщень, розміщення обладнання і організації робочого місця;
- 5) вимоги до персоналу;
- 6) контроль за станом виробничого середовища;
- 7) вимоги до застосувань засобів захисту;
- 8) вимоги до медичного контролю .

В залежності від типу конструкції та цілі призначення лазерів на обслуговуючий персонал можуть впливати наступні фактори:

1. лазерне випромінювання;
2. супутнє ультрафіолетове, видиме чи інфрачервоне випромінювання від джерела накачки;
3. висока напруга в ланцюгах керування і джерелах живлення;
4. рентгенівське випромінювання від газорозрядних трубок та інших елементів, що працюють при напрузі більше 5 кВ;
5. шум, вібрації;
6. токсичні гази і пара від лазерних систем з відповідною системою накачки;
7. продукти взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом, що обробляється(наприклад - продукти горіння);
8. підвищена температура поверхні лазерного виробу;
9. біологічні ефекти впливу лазерного випромінювання на організм , визначаються механізмами взаємодії випромінювання і залежать від

довжини хвилі випромінювання, тривалості імпульсу(впливу), площі опромінювальної ділянки, а також від біологічних та фізико-хімічних особливостей опромінювальних тканин та органів:

- $\lambda=380\div 1400$  нм – найнебезпечніше для сітківки ока;
- $\lambda=180\div 380$  нм і при  $\lambda>1400$  нм становить небезпеку для переднього середовища ока.

## Розділ 1. Обробка отворів

### §1. Фізичні основи взаємодії лазерного випромінювання з речовиною

Можливості використання лазерного випромінювання в якості інструменту для обробки матеріалів, визначаються закономірностями протікання процесів і явищ поглинання випромінювання поверхнею матеріалу, нагрівання, плавлення, ерозія матеріалу, утворення зон термічного впливу, зміна напружено-деформованого стану, дифузія в умовах теплового впливу на матеріал.

В залежності від густини потужності випромінювання –  $q$  і тривалості його впливу на матеріал, в процесі взаємодії лазерного випромінювання з речовиною, можна виділити 5 стадій:

- 1) падіння і часткове поглинання;
- 2) поглинання, нагрівання та утворення зони термічного впливу(ЗТВ);
- 3) плавлення;
- 4) ерозія;
- 5) утворення плазми (продукти горіння утворюють плазму на поверхні матеріалу).

Приведений поділ є дещо умовним (рис.1), оскільки не враховує параметри лазерного випромінювання, властивості матеріалу, навколишнє середовище та багато інших параметрів, що вносять корективи в явища, які відбуваються в зоні впливу лазерного випромінювання.

Розглянемо кожен з цих стадій на рівні лазерної індустріальної технології.

#### §1.1 Ефективні взаємодії лазерного випромінювання з речовиною

При падінні лазерного випромінювання на поверхню матеріалу, ефективність корисного використання енергії залежить від співвідношень відбитого і поглинутого випромінювання

$$R = 1 - A,$$

де  $R$  – відбиваюча,  $A$  – поглинаюча здатності матеріалу.

Коефіцієнт відбивання -  $R_0$  визначається як відношення інтенсивності відбитої частини випромінювання до інтенсивності всього падаючого випромінювання. При нормальному падінні коефіцієнт відбивання можна виразити як

$$R_0 = \frac{(n - 1)^2 + n^2 \xi^2}{(n + 1)^2 + n^2 \xi^2}$$

де  $n$ -показник заломлення матеріалу,

$\xi$  – коефіцієнт затухання.

Основні положення взаємодії

електромагнітного випромінювання з

металами визначають з рівнянь

Максвелла, які зв'язують оптичні

константи матеріалів з електромагнітною природою світла. За умови якщо

$$\frac{\sigma}{\nu} \gg 1,$$

де  $\sigma$  – електропровідність матеріалу, а  $\nu$  – частота електромагнітної хвилі, то розв'язок рівнянь Максвелла зводиться до

$$R_0 = 1 - \frac{2}{\sqrt{\sigma T}}, \quad \text{де } T = \frac{2\pi}{\nu} - \text{період коливання електромагнітної хвилі.}$$

Для прикладу – для частоти  $\nu = 2 \cdot 10^{14} \text{ с}^{-1}$ , при обробці мідного зразка ( $\sigma = 5 \cdot 10^{15} \text{ Ом}^{-1}$ ), що ведеться на довжині хвилі  $\lambda = 10,6 \text{ мкм}$  ( $\text{CO}_2$  - лазер) коефіцієнт відбивання  $R_0 = 0,985$ , з чого видно – що відбиваюча здатність металів є досить високою і залежить від довжини хвилі випромінювання. Зазначимо, що для довжини хвилі випромінювання  $\lambda = 0,2 \div 0,6 \text{ мкм}$ , ефективність поглинання світлової енергії є значною, але зі збільшенням довжини хвилі випромінювання, практично всі металеві матеріали значною мірою відбивають світло.

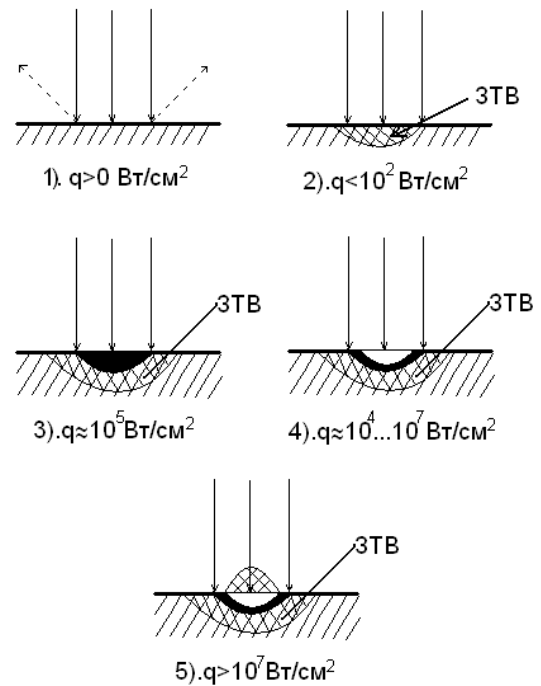


Рис. 1. Стадії взаємодії лазерного випромінювання з речовиною



На поглинаючу здатність значною мірою впливає температура матеріалу. Так при опроміненні імпульсним інфрачервоним випромінюванням, через деякий час спостерігається збільшення поглинаючої здатності (утворюється оксидна плівка на поверхні матеріалу, яка сприяє поглинанню випромінювання), тобто, зі збільшенням потужності

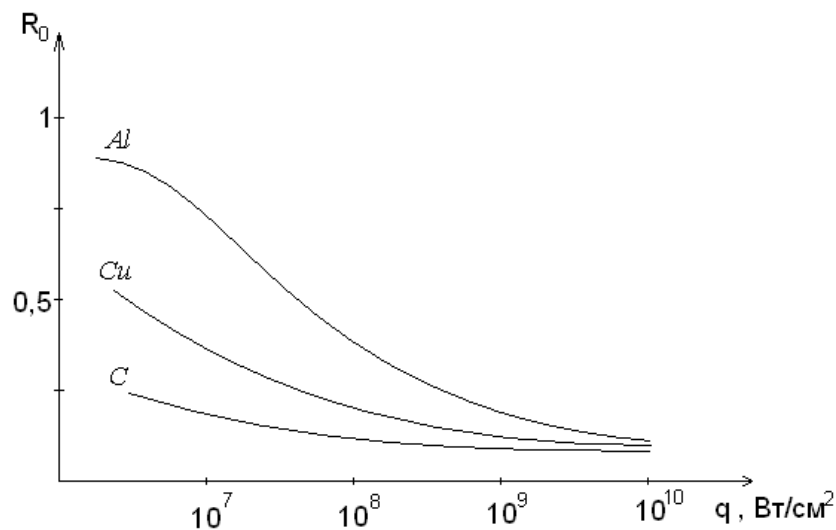


Рис.2. Залежність коефіцієнта відбивання різних речовин від потужності випромінювання

випромінювання – зменшується коефіцієнт відбивання, що показано на рис.2.

Поглинаюча здатність матеріалу може бути суттєво підвищена за допомогою спеціальної обробки оброблюваної поверхні:

- шляхом підвищення початкової шорсткості;
- нанесенням покриттів з неметалевої тонкої плівки ( $\text{Fe}_2\text{S}$ ,  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ ).

Ефективність взаємодії лазерного випромінювання з речовиною може бути підвищена, якщо враховувати поляризацію і кут падіння випромінювання на поверхню матеріалу (при падінні випромінювання на матеріал під кутом Брюстера р-компонента повністю поглинається).

## §1.2. Теплофізика впливу випромінювання на матеріал

### §1.2.1. Поглинання і передача енергії

Всі матеріали поділяються на метали, напівпровідники та діелектрики. Механізм поглинання лазерної енергії і перехід її в теплову енергію залежить від природи матеріалу.

Для металів, оптичні властивості яких описуються за допомогою моделей вільних електронів, характерним є поглинання квантів світла електронами провідності. В результаті підвищується енергія електронів, яка передається іншим електронам і кристалічній ґратці. Передача енергії від тонкого поверхневого шару до об'єму матеріалу здійснюється за допомогою різних механізмів теплопровідності. Вирішальне значення при цьому має температура поверхні: при низькій температурі – суттєву роль відіграє фотонна теплопровідність, при високих – електронна теплопровідність.

Для напівпровідників поглинання світла в основному зумовлене зв'язаними носіями. При певних умовах, під дією лазерного випромінювання, електрони валентної зони переходять в зону провідності. Поки концентрація вільних носіїв заряду невелика – невеликою є і передача енергії, а отже, передача енергії від електронів до ґратки є зсунутою в часі, порівняно металами. Ступінь поглинання напівпровідників залежить від довжини хвилі випромінювання, енергетичних параметрів променів, виду напівпровідника, домішок, що входять до його складу, стану поверхні напівпровідника та інше. Передача енергії від поверхневого шару вглиб напівпровідника здійснюється різними механізмами теплопровідності:

- на початку – фотонна;
- зі збільшенням концентрації вільних електронів – електронна.

Для діелектриків характерним є об'ємний механізм поглинання.

В прозорих матеріалах поглинання лазерного випромінювання може здійснюватись за допомогою безпосередньої взаємодії квантів випромінювання з ґраткою.

### §1.2.2. Нагрівання і плавлення

Поглинання енергії лазерного випромінювання і перехід цієї енергії в теплову, в поверхневому шарі матеріалу, призводить до різкого зростання температури матеріалу в зоні лазерного впливу. Оцінку процесів теплообміну в твердому тілі при опроміненні його лазерним випромінюванням можна провести теоретично.

При імпульсній обробці, в більшості випадків, припускають Гауссовий розподіл питомого теплового потоку, густина енергії при цьому рівна

$$q(x) = q_0 e^{(-x^2/r^2)},$$

де  $q_0$  – густина потужності випромінювання в центрі плями фокусування,  $r$  – радіус Гауссового пучка.

Рівняння теплопровідності

$$T(x, z, t) = \frac{q_{max} \cdot r^2}{k} \left(\frac{a}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}} \int_0^t \frac{p(t-t') \cdot \exp\left[\frac{z^2}{4a \cdot t} - \frac{x^2}{4a \cdot t'}\right]}{\sqrt{t'(4a \cdot t' \cdot t \cdot r^2)}} dt',$$

$$p(t) = \frac{q(t)}{q_{max}}; \quad a = \frac{k}{\rho \cdot c},$$

$k$  – коефіцієнт теплопровідності,

$a$  – коефіцієнт температуропровідності (наскільки швидко матеріал «сприймає» і передає енергію),

$c$  – питома теплоємність,

$\rho$  – густина матеріалу.

Глибина і швидкість проплавлення визначається коефіцієнтом температуропровідності, що залежить від природи речовини.

### §1.2.3. Лазерна ерозія

Лазерна ерозія представляє собою процес видалення матеріалу із зони лазерного впливу у вигляді розплаву та випареної фази матеріалу. З

збільшенням потужності випромінювання спостерігається вибуховий вихід продуктів лазерної ерозії.

При теоретичному розгляді, зазвичай, процес ерозії зводиться до аналізу механізмів випаровування.

Як при використанні імпульсного, так і неперервного випромінювання, для аналізу процесів лазерної ерозії, слід розв'язати рівняння теплопровідності. Для теоретичної оцінки процесів лазерної ерозії може також використовуватись газодинамічна теорія випаровування (руйнування). Однак, як теплова, так і газодинамічна модель мають лише якісний розв'язок.

#### §1.2.4. Остигання

При закінченні дії лазерного випромінювання, або переміщенні неперервного випромінювання, вздовж оброблюваної поверхні відбувається остигання нагрітого і розплавленого матеріалу. Висока локалізація впливу лазерного випромінювання, призводить до того, що тепловивід здійснюється в масиві матеріалу. Це дозволяє отримати в металевих сплавах загартовану структуру високої твердості, і таким чином реалізувати технологію лазерної термообробки.

Збільшення густини потужності випромінювання дає можливість досягнути високих швидкостей остигання, однак при цьому зона термічного впливу зменшується, оскільки температура випаровування матеріалу досягається швидше.

### §1.3. Основні технологічні закономірності процесу обробки отворів

#### §1.3.1. Розмірні характеристики

Керованими параметрами процесу лазерної обробки отворів є:

- енергія випромінювання (імпульсів) –  $E$ ;
- тривалість імпульсу –  $\tau$ ;
- фокусна відстань фокусувальної системи –  $F$ ;

- зміщення поверхні деталі відносно фокальної площини фокуруючої системи -  $\Delta F$ ;
- кількість імпульсів –  $n$ .

Зміна цих параметрів впливає на розмірні характеристики отворів, тобто – на форму і розмір отвору.

Керовані параметри можуть змінюватись у досить широких межах:

- зі збільшенням енергії випромінювання імпульсів –  $E$ , зростає як діаметр, так і глибина отворів;
- збільшення фокусної відстані фокуруючої системи при малих енергії випромінювання та тривалості імпульсу, призводить до зменшення густини потужності, що призводить до зменшення глибини отвору.

При впливі на матеріал імпульсів різної тривалості, характер руйнування поверхні не є однаковим. Так при дії коротких імпульсів, за рахунок більш високої густини енергії, що підводиться до оброблюваного матеріалу, зростає температурний градієнт, що веде до зростання випаровуваної частини матеріалу в продуктах лазерного викиду (ерозії).

У випадку дії тривалих ( $\tau=0,1 \cdot 10^{-3} \div 2 \cdot 10^{-2}$  с) імпульсів – в продуктах викиду переважає розплавлений матеріал, що залишається біля краю отвору.

Значний вплив на форму і розміри отворів має кількість імпульсів –  $n$ . Зі

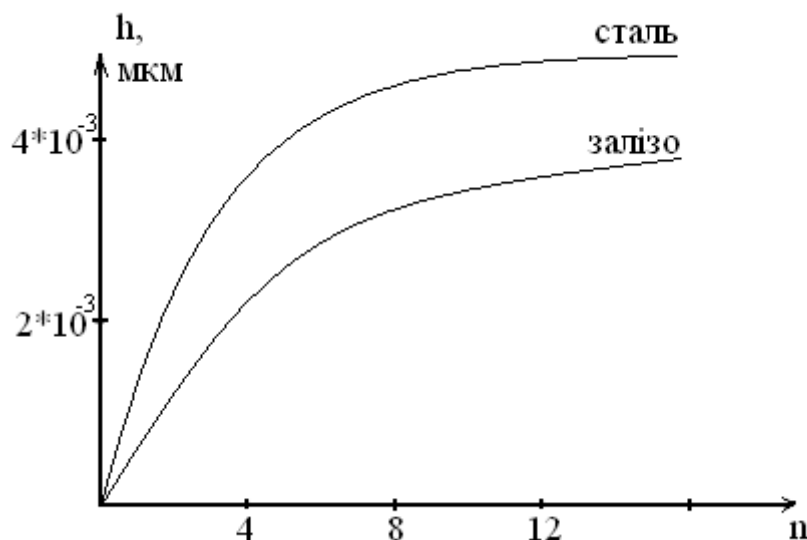


Рис.3. Залежність глибини отворів від кількості імпульсів

збільшенням кількості імпульсів, в зону обробки послідовно подається велика кількість енергії, однак при цьому не спостерігається таке значне збільшення діаметру і глибини отвору, як у випадку дії одного імпульсу, але більшої енергії випромінювання. Глибина отвору зі збільшенням кількості імпульсів зростає, але до деякої межі (рис.3), що визначається параметрами оптичної системи, енергією імпульсів, тривалістю імпульсів, властивістю матеріалу, та ін.

Форма отвору залежить від енергії випромінювання  $E$ . Збільшення густини енергії випромінювання і при послідовній дії імпульсів, утворюється отвір – форма якого являє собою ряд краплевидних послідовних областей (рис.4).

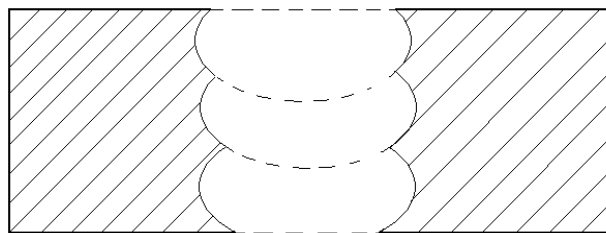


Рис.4. Профіль отвору отриманий імпульсним лазерним випромінюванням

Важливим параметром, що впливає на форму та розмір отворів є величина зміщення деталі відносно фокальної площини фокусуєчої системи -  $\Delta F$  (рис.5).

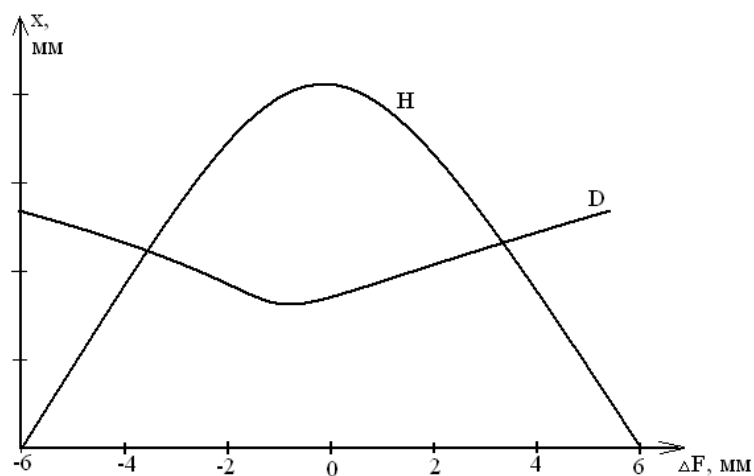


Рис.5. Вплив зміщення деталі відносно фокальної площини: H- глибина отвору, D – діаметр отвору

Найбільший діаметр і найбільша глибина отвору отримується при розташуванні деталі в зоні між фокальною площиною фокуруючої оптики та самою фокууючою оптикою – тобто при певному  $\Delta F < 0$ , чи рідше при  $\Delta F = 0$ .

### §1.3.2. Вибір оптимальних режимів обробки

Існує проблема розробки інженерних методів розрахунку і вибору оптимальних режимів обробки отворів із заданими характеристиками.

За звичай емпіричні залежності відображають залежність розмірних характеристик від зміни одного або декількох параметрів, при фіксованих значеннях інших параметрів. Базуючись на цих емпіричних залежностях, що отримані при експериментальній обробці на даному лазерному обладнанні, можна побудувати ряд номограм для вибору оптимального режиму обробки

### §1.3.3. Якість поверхні отвору

Мікрорельєф оброблюваної поверхні визначається в основному гідродинамічними процесами, які мають місце при взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом. При визначенні впливу режимів обробки на шорсткість поверхні, найважливішим є такі три параметри:

- енергія лазерного випромінювання –  $E$ ;
- тривалість імпульсу –  $\tau$ ;
- кількість імпульсів –  $n$ .

Приведемо формулу визначення висоти мікронерівностей поверхні отвору:

$$R_z = C_E \cdot E^x,$$

де  $C_E$  – коефіцієнт що характеризує властивості матеріалу і режим обробки;  $x$  – показник ступеня, що залежить від обробки.

Залежність висоти мікронерівностей від тривалості імпульсу наводиться наступним чином:

$$R_z = C_\tau \cdot \tau^{-y},$$

з чого видно – що шорсткість зменшується зі збільшенням тривалості імпульсу.

Залежність висоти мікронерівностей від кількості імпульсів наводиться як:

$$R_z = C_n \cdot n^z .$$

В загальному випадку залежність шорсткості наводиться :

$$R_z = CE^x t^{-y} n^z .$$

Таким чином, з приведених закономірностей видно, що зі збільшенням потужності випромінювання і/або при зменшенні тривалості імпульсу висота мікронерівностей поверхні зростає.

Розглядаючи вплив різних факторів на мікрорельєф поверхні, слід враховувати випадкові відхилення від геометричного профілю отвору, що спричиняються різноманітними сторонніми включеннями, забрудненістю, пористістю матеріалу та інше.

Якість поверхні обробленого отвору характеризується не тільки шорсткістю, а й параметрами дефектного шару.

Дефектний шар – граничний до площини отвору, шар матеріалу з властивостями, що відрізняються від вихідного матеріалу. Цей шар являє собою зону термічного впливу і для більшості металів і сплавів володіє підвищеною твердістю (глибина цього шару 10÷15 мкм).

#### §1.3.4. Точність лазерної обробки отворів

Діапазон діаметрів отворів, як правило становить 1÷500 мкм, для цього діапазону діаметральних отворів поле розсіювання (похибка) знаходиться в межах від 5÷12 мкм до 35÷60 мкм – в залежності від діаметру отвору.

Точність лазерної обробки визначається як похибками технологічного процесу, так і похибками обладнання, а також властивостями оброблюваного матеріалу.

Похибки обробки в основному визначаються похибками густини потужності випромінювання -  $\Delta q$ . Похибка густини потужності



випромінювання залежить як від енергетичних похибок, які в свою чергу визначаються нестабільністю енергії -  $\Delta E$ , і часовими похибками імпульсу -  $\Delta t$ , так і від похибки фокусування  $\Delta F$ , що призводить до неточності розмірів фокальної плями. На точність обробки значною мірою впливають різноманітні похибки оброблюваного матеріалу (нестабільність фізико-хімічних властивостей, похибки через включення чи домішки).

### §1.3.5. Продуктивність

Цей технологічний параметр можна трактувати по різному, з одного боку його можна розглядати як питому ерозію матеріалу (питомий об'єм матеріалу за одиницю часу), з іншого боку, в якості продуктивності можна розуміти кількість отворів необхідних розмірів і точності прошитих за одиницю часу.

Об'ємний показник продуктивності ( $\text{см}^3/\text{с}$ ) зазвичай розглядають стосовно одного отвору

$$P = \frac{60nEf}{L_e}, \quad \left[ \frac{\text{см}^3}{\text{хв}} \right],$$

де  $f$  – частота подачі імпульсів;  $L_e$  – питома енергія руйнування даного матеріалу. Наприклад :твердий сплав ВК6 при числі імпульсів  $n=6$  з енергією випромінювання  $E=20$  Дж, частоті подачі імпульсів  $f=10$  Гц і питомій енергії руйнування даного сплаву  $L_e=160$  Дж/см<sup>3</sup> продуктивність  $P=0,45$  см<sup>3</sup>/хв.

Показник штучної продуктивності (кількість отворів за хвилину) використовується при оцінці можливості обробки серій отворів в деталі:

$$P_{\text{шт}} = \frac{N}{nT + t_n},$$

тут  $N$  – кількість каналів променів в технологічній установці (1÷3);  $T$  – період імпульсів;  $t_n$  – час переміщення променів або заготовки після прошивки одиничного отвору.

#### §1.4. Способи вдосконалення прошивки отворів

Підвищення точності обробки може бути досягнуте покращенням конструкції лазерних технологічних установок, підвищенням їх техніко-експлуатаційних характеристик, зменшенням складових похибок.

Інший напрям вдосконалення процесу полягає в створенні і використанні різних технологічних прийомів, що дозволяють стабілізувати умови лазерної ерозії, відокремити ряд небажаних ефектів, що супроводжують цей процес.

Розглянемо докладніше способи вдосконалення лазерної обробки.

Спосіб1 – підведення додаткової енергії в зону впливу лазерного випромінювання. Традиційно, лазерна обробка зв'язана з отриманням отворів діаметром до 500мкм. Ці межі не намагаються розширити, оскільки отвори більших діаметрів можна отримувати іншими методами обробки, однак продуктивність при лазерній обробці є набагато вищою. Отвори великих діаметрів можна отримувати шляхом збільшення енергії імпульсу, розміру фокальної плями або використання спеціальних систем фокусування випромінювання, однак вказані шляхи не завжди придатні. Тому інтенсифікація процесу лазерної обробки здійснюється шляхом підведення додаткової енергії (спів розмірної з енергією лазерного імпульсу) в зону дії випромінювання.

Одним із способів підведення додаткової енергії є попередній нагрів заготовки перед подальшою обробкою (високочастотним електричним струмом). Такий прийом дозволяє збільшити продуктивність обробки, розширити діапазон розмірних параметрів і значно зменшити імовірність утворення мікротріщин, що спричиняються термічною напругою матеріалі, в умовах прикладання імпульсного теплового навантаження.

Недоліком такого методу є значна деформація заготовки під час нагрівання, тривале остигання заготовки, а також можливість застосування електричного нагрівання тільки для заготовок відносно простої деталі.

Спосіб 2 – підведення додаткової енергії у вигляді електричного розряду.

Для цього, імпульс лазерного випромінювання вводиться в систему двома електродами, в ролі одного з яких виступає сама заготовка (рис.6).

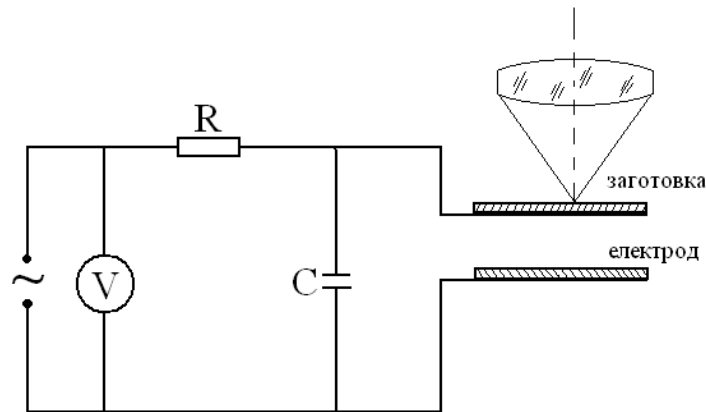


Рис.6. Лазерна установка з підведенням додаткової енергії у вигляді електричного розряду

Змінюючи розміри між електродного проміжку, можна керувати величинами вхідного і вихідного діаметрів отвору, при певному співвідношенні напруги і ємності конденсатора. При використанні такого методу обробки зменшується шорсткість оброблюваної поверхні. Найбільш суттєвим фактором, що визначає характер формування рельєфу мікроповерхонь – це енергія електричного розряду, яка реалізується в між електродному просторі.

Спосіб 3 – накладання ультразвукових коливань на заготовку.

Для цього заготовку кріплять на столі, що жорстко зв'язаний з ультразвуковим концентратором. Передача заготовці ультразвукових коливань (частота-20 кГц, амплітуда коливань 10÷50 мкм) призводить до збільшення діаметру і глибини отвору, підвищує точність обробки, сприяє кращому видаленню продуктів ерозії з зони обробки.

### §1.5. Розроблені технологічні процеси лазерної прошивки отворів

Прошивка отворів за допомогою лазерного випромінювання здійснюється у наступних випадках:

- 1) Обробка серії отворів в довгомірних трубчастих та листових заготовках – завдяки ліквідації операції розмітки, зняття зазубрин спеціальним інструментом на внутрішній поверхні трубки, операції лазерної обробки є більш ефективною в порівнянні з механічною(прикладом можуть бути трубки довжиною  $0,5\div 3$  м , товщина стінок – близько 1 мм, діаметр отворів  $15\div 40$  мкм).
- 2) Обробка отворів в годинникових каменях та алмазних волоках.
- 3) Обробка отворів закріплюючих деталей – деякі види кріплень з певними отворами, діаметром 1,5 мм (в авіапромисловості).
- 4) Отримання отворів в діафрагмах (отвори мають правильну форму та рівні краї).
- 5) Отримання отворів в корпусах розпилювачів паливної апаратури –  $0,25\div 0,35$  мм (8 отворів на 0,7 хвилини, енергія випромінювання  $E=8$  Дж, тривалість імпульсу  $\tau=1$  мс; також використовують електро-іскрову прошивку – 15 отворів на хвилину, або свердлом).
- 6) Обробка газовивідних отворів у вкладишах вилитих пресформ.
- 7) Обробка отворів в керамічних матеріалах (фільера), феритових пластинках та ін..
- 8) Обробка отворів в деталях пластмас.
- 9) Обробка отворів в інших типах деталей – в деталях медичного інструменту.

#### §1.6. Обладнання для лазерної прошивки отворів

Універсальні установки, що серійно випускаються, призначені для прошивки отворів в різноманітних деталях.

Спеціалізовані установки створюються шляхом модернізації обладнання для прошивки отворів деталей одного виду. Для цього використовуються часткові конструктивні установки, які оснащуються додатковими вузлами і кріпленнями . Загальна принципова схема установки для лазерної прошивки отворів зображена на рисунку 7. Основними

елементами, що входять у дану схему є: БЖ – блок живлення; П – блок підпалу; ІЄН – індуктивно-ємнісний накопичувач; Л – лазер; РПФ – рухомий пристрій фокусування; ВМ – виконавчий механізм; КД – крокові двигуни; ПК – пульт керування; БЗО – блок захисту оптики від продуктів лазерної ерозії; ЗПК – загальний пульт керування установкою; Д – деталь.

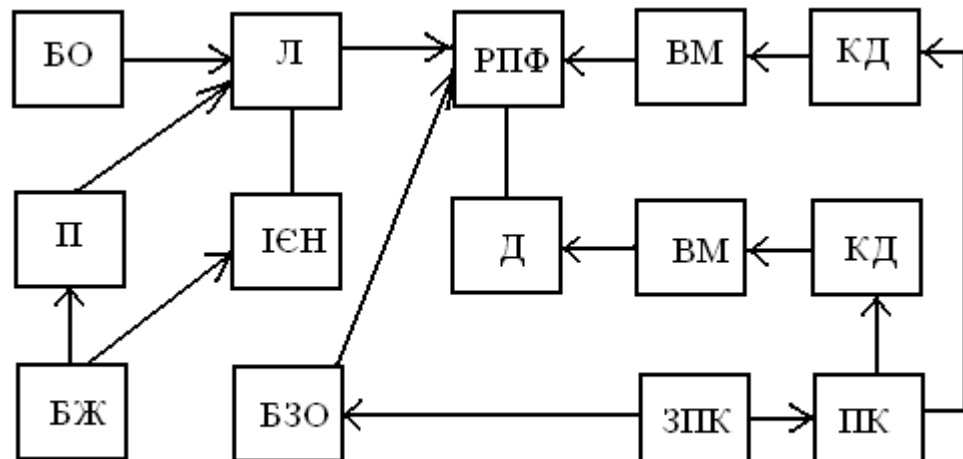


Рис.7. Загальна принципова схема лазерної установки для прошивки оиворів

## **Розділ 2. Різка лазерним випромінюванням**

Високі температури, що розвиваються в зоні дії лазерного впливу, дозволяють реалізувати кероване лазерне руйнування і на основі цього створити високоефективні технологічні процеси лазерної різки, розкрюювання матеріалу, отримання щілин, пазів, різів, лазерного скрайбування, термічного розколювання твердих тіл і крихких матеріалів.

Зазначені процеси можуть бути виконані як імпульсним, так і неперервним випромінюванням, при чому, імпульсне випромінювання доцільно використовувати в тих випадках, коли необхідно виконати прецизійну різку (з високою точністю), отримати щілини, пази малих розмірів з високою точністю. Продуктивність при цьому відходить на другий план, бо лазерна обробка в таких випадках є єдиним технологічним засобом забезпечення конструкторської задачі.

Неперервне випромінювання навпаки – дає можливість здійснювати високопродуктивну різку, при чому – з незначними витратами матеріалу при обробці, але точність і якість при цьому дещо поступаються випадку різці імпульсним випромінюванням.

### § 2.1. Основні закономірності різки імпульсним лазерним випромінюванням

Ефективність процесу різки визначається такими технологічними параметрами:

- швидкість різки;
- розміри пазу чи різу;
- шорсткість поверхні;
- точність обробки.

Знаючи закономірності зміни цих параметрів, можна визначити оптимальні режими різки імпульсним лазерним випромінюванням.

Швидкість різки визначається за формулою

$$\vartheta = \frac{nDk_n}{t},$$

де  $n$  – кількість імпульсів,  $D$  – діаметр елементарної лунки (отвору),  $k_n$  – коефіцієнт перекриття,  $t$  – час обробки (див. рис.8).

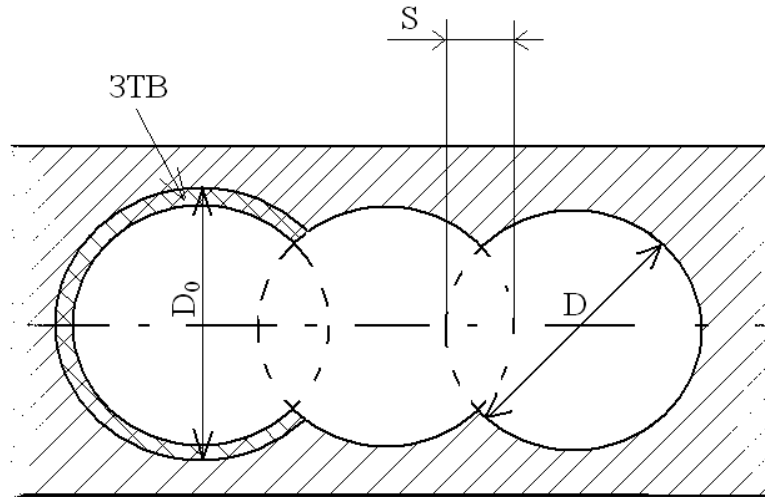


Рис.8. Процес різки імпульсним лазерним випромінюванням

Коефіцієнт перекриття визначається як відношення кроку обробки –  $S$  до діаметра елементарної лунки, тобто

$$k_n = \frac{S}{D}.$$

При роботі лазерного обладнання в імпульсному режимі, який визначається частотою імпульсів –  $f$  швидкість різки

$$\vartheta = k_n D f = f S.$$

Джерело імпульсного випромінювання вважається нерухомим, якщо виконується умова

$$\tau < \frac{0,1D_0}{2\vartheta},$$

де  $D_0$  – діаметр плями фокусування. Тому, незважаючи на неперервне пересування деталі або променя з певною швидкістю –  $v$ , процес утворення чергового елементарного отвору не залежить від швидкості обробки і протікає аналогічно до випадку з нерухомим променем.

Ця залежність справедлива при малій товщині оброблюваного матеріалу, коли під впливом чергового імпульсу утворюється наскрізний отвір. З збільшенням товщини матеріалу, кожен елементарний отвір утворюється під впливом декількох імпульсів (див. рис.9).

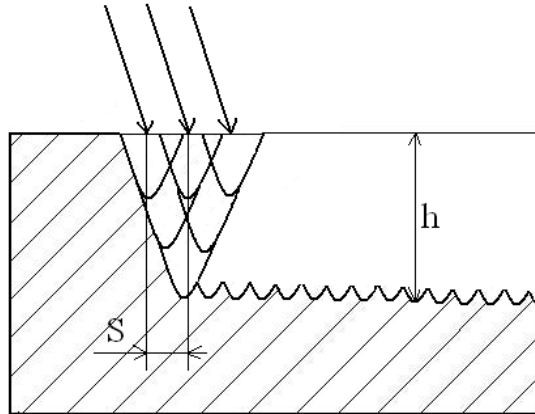


Рис.9.Принципова схема різки імпульсним лазерним випромінюванням

Після переміщення променя вздовж напрямку обробки на величину кроку –  $S$ , передній край світлової плями попадаючи на верхній шар матеріалу, утворює черговий елементарний отвір (заглибину). В той же час, інша частина випромінювання заглиблює отвір, утворений раніше, при цьому повна глибина різку залежить від кількості імпульсів, які припадають на кожен елементарний отвір в процесі руху променя чи деталі. Кількість імпульсів в свою чергу залежить від кроку обробки, швидкості обробки і може визначатися як:

$$n = \frac{D_0 + D}{2S} + 1 \approx \frac{1}{k_n} .$$

Знайдемо залежності для глибини  $h$  і ширини різку  $b$  при обробці одиничного отвору імпульсним випромінюванням:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{2 \tan \gamma}\right)^3 + \frac{3E}{\pi k_n \tan^2 \gamma L_B}} - \frac{D_0}{2 \tan \gamma} ,$$

$$b = 2 \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{2}\right)^3 + \frac{3E}{\pi L_B} \tan \gamma} ,$$

де  $E$  – енергія випромінювання імпульсів,



$L_B$  - теплота випаровування матеріалу ,

$\gamma$  – половинний кут «світлового конусу».

Ця модель дає деяку розбіжність з експериментальними даними. Глибина різі не може зростати до безмежності при збільшенні енергії випромінювання і при зменшенні швидкості обробки. Зростання глибини відбувається внаслідок зменшення густини енергії випромінювання по мірі його проникнення в різ , при зниженні цього параметра до деякого порогового значення – подальший ріст вглиб припиняється.

Мінімальна швидкість обробки – при якій ще буде відбуватися формування різі, визначається за умови  $k_n=1$  та  $S=D$ :

$$v_{min} = 2f^2 \sqrt{\left(\frac{D_0}{2}\right)^2 + \frac{3E}{\pi L_B} \tan \gamma} .$$

### §2.1.1. Форма різі

Параметри, що впливають на форму і розміри характеристики різі є величина і напрямок зміщення поверхні деталі відносно фокальної площини фокуруючої системи  $\Delta F$ .

Збільшення глибину різі спостерігається при деякому заглибленні променя вглиб матеріалу, в той час як найменша ширина різі отримується при  $\Delta F=0$  мм (див.рис.10).

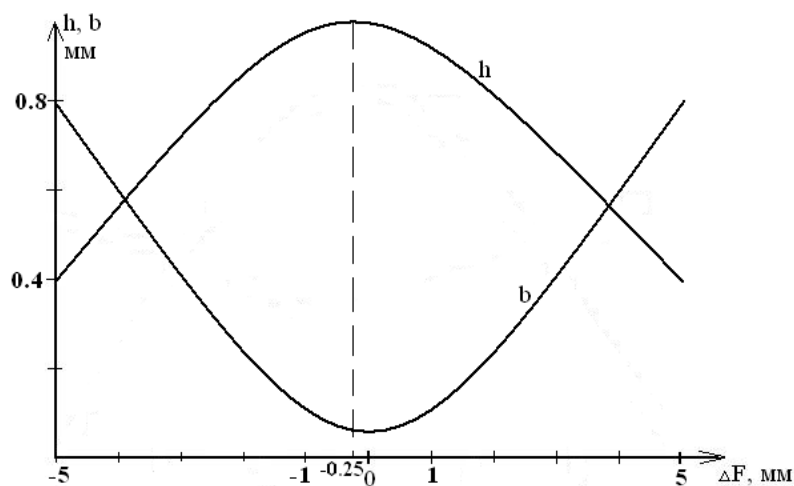


Рис.10. Залежність глибини  $h$  та ширини різі  $b$  від параметра розфокусування системи  $\Delta F$

Керуючи параметром  $\Delta F$ , можна впливати на форму поперечного перерізу різь. При сталій товщині заготовки, збільшенням густини енергії випромінювання зменшується клиновидність різь. З ростом коефіцієнта перекриття -  $k_n$  або кроку обробки -  $S$ , клиновидність різь значно збільшується.

### §2.1.2. Шорсткість різь

Даний параметр, при імпульсній обробці, із суто геометричних міркувань, визначається величинами  $D$  і  $S$ .

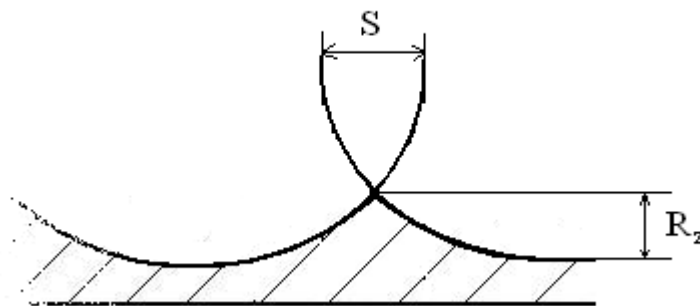


Рис.11. Шорсткість різь -  $R_z$  та крок обробки -  $S$

Теоретично – висота мікронерівностей визначається параметром  $R_z$ :

$$R_z^T = 0,5D - 0,5\sqrt{D^2 - S^2} = 0,5D \left(1 - \sqrt{1 - k_n^2}\right).$$

Якщо  $D \approx 2,44\lambda \frac{F}{d}$ , де  $F$  – фокусна відстань, а  $d$  – діаметр фокусувальної лінзи, то тоді параметр шорсткості визначатиметься, як:

$$R_z^T = \frac{1,22 \lambda F}{d} - 0,5 \sqrt{2,44\lambda \frac{F}{d} - S^2}.$$

Зі збільшенням кроку обробки – спостерігається швидке більш зростання висоти мікронерівностей ніж з збільшенням діаметра елементарного отвору. У випадку  $S=D$  параметр шорсткості  $R_z^T = 0,5D$ . Тому найвища продуктивність (швидкість різки) призводить до низької якості обробки поверхонь.

### §2.1.3. Точність розмірних параметрів

При різці імпульсним випромінюванням, точність розмірних параметрів визначається тими ж факторами, що й точність прошивки отворів, але окрім цих факторів, на точність різку впливають похибки відносного переміщення променя або заготовки, тому аналітичне визначення похибки ускладнюється.

Експериментальна оцінка показує, що поле розсіяння дійсних розмірних параметрів становить близько 8 - 10% , при чому – зі збільшенням кроку обробки поле розсіювання дещо збільшується. Зменшення точності в цьому випадку пояснюється специфікою формування мікрорельєфу поверхні і профілю різку за значного коефіцієнта перекриття.

Як на шорсткість, так і на точність різку суттєво впливає перерозподіл рідкої фази на стінках різку.

### §2.1.4. Вибір оптимальних режимів обробки

При виборі оптимальних режимів різки імпульсним лазерним випромінюванням, використовують математичні моделі, розроблені на базі поліфакторного планування експериментів.

Такі моделі, що містять велику кількість технологічних факторів, отримуються у вигляді рівнянь регресій, при реалізації багатфакторних експериментальних процесів.

Найбільший вплив на глибину різку здійснює енергія випромінювання і швидкість обробки. Глибина зростає зі збільшенням енергії і зменшенням швидкості обробки. Глибина різку зростає, однак менш інтенсивно при зменшенні тривалості імпульсу та збільшенні фокусної відстані фокусуєної лінзи.

При необхідності отримання глибоких пазів та різків, обробку слід вести довгофокусною оптикою на низьких швидкостях відносного переміщення променя і заготовки, а також при високих потужностях випромінювання.

Ширина різки на верхній і нижній границях матеріалу зростає зі збільшенням енергії –  $E$ , збільшенням фокусної відстані –  $F$  та зменшенням тривалості імпульсу –  $\tau$  і не залежить, для верхньої границі, від швидкості різки. Зменшення швидкості різки призводить до зростання ширини різки на нижній границі матеріалу і до зниження клиновидності різки. Таким чином, вузькі щілини, різки, пази, можуть бути отримані при різці короткофокусною оптикою випромінюванням низької потужності. Зниження швидкості відносного переміщення променя відносно заготовки, дозволяє отримати різки великої глибини і малої клиновидності.

#### §2.1.5. Вдосконалення процесу різки імпульсним лазерним випромінюванням

Вдосконалення процесу різки імпульсним лазерним випромінюванням досягається підвищенням якості різки і збільшенням продуктивності обробки.

Якість поверхні різки в основному визначається кількістю рідкої фази в продуктах лазерної ерозії, том у одним із засобів покращення якості поверхні є зменшення частин рідкої фази, зокрема за рахунок збільшення густини енергії та за рахунок зменшення тривалості імпульсу. Технологічним способом підвищення якості є повторне або багаторазове проходження лазерного випромінювання по різку з тією самою або різною швидкістю. Різновидом цього технологічного способу є обробка скануючим променем. В цьому випадку, окрім основного відносного зміщення променя, променю надається додаткове скануючи переміщення з невеликою амплітудою і певною круговою частотою.

Іншим технологічним способом є обробка в рідкому середовищі. Рідина виконує наступні функції:

- 1) захоплюючи частинки розплаву і парів металу, що викидаються із зони лазерного впливу, рідке середовище сприяє процесу диспергування продуктів ерозії - утворенні гранул куле видної форми;

- 2) захоплення частинок металу рідким середовищем перешкоджає осіданню продуктів лазерної на поверхню різки, що призводить до зниження шорсткості оброблюваної поверхні;
- 3) рідке середовище видаляє продукти лазерної ерозії із зони обробки, сприяючи більш стабільному протіканню процесу.

В якості рідкого середовища, здебільшого, використовують воду або чотири хлористий вуглець.

## §2.2. Технологічні характеристики процесу різки неперервним лазерним випромінювання

Використання неперервного лазерного випромінювання значно розширює технологічні можливості в процесі різки і розкроювання матеріалу. Для цього можуть використовуватись лазери різного типу – найпоширеніше  $\text{CO}_2$  – лазер, що працює в інфрачервоній області спектра.

Для інтенсифікації процесу, зазвичай, разом із лазерним випромінюванням подається струмінь газу, що слугує для видалення продуктів ерозії із зони впливу лазерного випромінювання, запобігання окислення(горіння) матеріалу. Такий процес називається *газолазерною різкою*. Газ зазвичай подається співвісно з променем за допомогою спеціального сопла(див.рис.12).

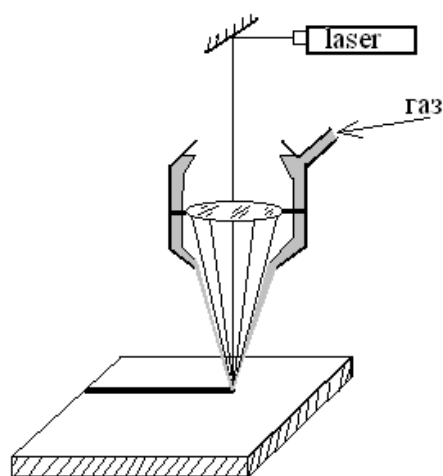


Рис.12. Процес газолазерної різки

### § 2.2.1. Різка металевих матеріалів

Основними технологічними характеристиками процесу різки неперервним випромінювання є наступні:

- швидкість (продуктивність);
- ширина;
- глибина;
- розміри зони термічного впливу;
- шорсткість і точність різку.

Закономірності зміни цих параметрів визначаються потужністю лазерного випромінювання, видом і типом робочого газу, типу оброблюваного матеріалу, умовами фокусування, та ін..

#### а) Ширина різку

Цей параметр найбільшою мірою характеризує можливості обробки, оскільки головним недоліком традиційних методів різки є дуже велика ширина різку і відповідно – значна кількість відходів.

Згідно теорії квазістаціонарного руйнування матеріалу, ширина різку визначається наступним чином:

$$b = 2 \left( r_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{2r}\right)^2} + x_s \right),$$

$$\text{де } x_0 = \frac{2a}{v} \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{k}{a} v \left(\frac{T-T_0}{q}\right)} \right), \quad x_s = \sqrt{a(t_0 - t_n)},$$

$$t_n = \frac{2a}{v^2} \left( 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{k}{a}\right) v \left(\frac{T - T_0}{q}\right)} \right),$$

$r_0$  - радіус плями фокусування;

$x_0$  – відстань, на яку зміститься лазерне джерело вздовж верхньої грані матеріалу за час встановлення квазістаціонарного режиму руйнування -  $t_0$ ;

$x_s$  – розмір зони рідкого металу, що утворився за час  $t_n$  – необхідний для досягнення температури плавлення  $T_n$ ;  $T_0$  – вихідна температура матеріалу;  $T$

– температура в зоні лазерного впливу;  $k$  – коефіцієнт теплопровідності;  $a$  – коефіцієнт температуропровідності;  $v$  – швидкість переміщення лазера.

При великих швидкостях обробки, коли можна знехтувати тепловідводом з зони опромінення, вираз для визначення ширини різку спрощується:

$$b = 2r_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{2r}\right)^2} .$$

Ширина різку залежить від виду матеріалу та режимів обробки. Діапазон швидкостей для різних товщин матеріалів (та в залежності від типу матеріалу) різний:

$$h = 5,2 \text{ мм} \rightarrow 1 \div 2,5 \text{ м/хв.},$$

$$h = 1 \text{ мм} \rightarrow 1 \div 8 \text{ м/хв.}$$

На ширину різку певним чином впливає тиск газу, але характер цього впливу різний для різних швидкостей обробки:

для швидкості обробки  $v = 0,5 \div 2 \text{ м/хв}$  беруть тиск газу  $P = 0,1 \div 0,2 \text{ МПа}$ , при чому, ширина різку є максимальною, але зі збільшенням швидкості різки, ширина різку стає незалежною від тиску робочого газу.

#### б) Зона термічного впливу

Розміри зони термічного впливу зменшуються зі збільшенням швидкості обробки. Також зона термічного впливу залежить від тиску газу, зі збільшенням потужності випромінювання зростають розміри зони термічного впливу.

#### в) Шорсткість поверхні

Поверхня різку формується розплавленим матеріалом, що застиг після зміщення лазерного променя. Тому топографія поверхні (специфіка розташування мікронерівностей) визначається розмірами зони розплавленого матеріалу -  $x_s$ . Теоретично, висота мікронерівностей  $R_z^T = 0,134x_s$ , хоча реально – на шорсткість поверхні впливає ще ряд факторів і умов обробки (товщина заготовки, тиск і вид робочого газу, тип матеріалу).

При значних товщина матеріалу ( $h > 1$  мм) шорсткість не є однаковою по поверхні різь. В області різь, близькій до входу випромінювання, параметр шорсткості є мінімальним і зростає в тій частині, де промінь виходить з матеріалу. Зі зміною швидкості, змінюється і шорсткість по всій поверхні різь - при тиску газу  $P = 0,15$  МПа оптимальна швидкість для найменшої величини параметра шорсткості:

$$h = 2,2 \text{ мм} \rightarrow v = 3 \text{ м/хв.},$$

$$h = 3,3 \text{ мм} \rightarrow v = 2 \text{ м/хв.}.$$

З збільшенням тиску газу шорсткість поверхні стає більш однорідною. При різці вуглецевої сталі з великою товщиною (5,2 мм) на незначній швидкості ( $v = 0,5$  м/хв.) відбувається інтенсивне горіння матеріалу, після того, як матеріал нагріється до температури – достатньої для підтримки такого процесу. Тому на початку різь його ширина не велика, але після того, як зразок нагріється та ініціюється процес горіння – ширина різь стає в 4÷6 разів більшою за початкову.

Виділяють дві експериментальні умови утворення ґрату (продуктів горіння) :

- 1) висока швидкість обробки, а питома енергія випромінювання не достатня для повного розплавлення матеріалу;
- 2) дуже низька швидкість обробки – коли процес горіння домінує в процесі руйнування матеріалу.

Ступінь ґратоуворення залежить від типу матеріалу, швидкості різьки, тиску і виду робочого газу.

При виборі оптимальних режимів, слід виходити з того, які вимоги ставляться до процесу різьки – найвища можлива швидкість різьки (продуктивність) чи різька з найвищою якістю різьки.

В першому випадку ширина різьки буде мінімальною, так само, як і розмір зони термічного впливу, але шорсткість поверхні і кількість ґрату будуть значними.



В другому випадку – швидкість різки буде меншою за мінімальну, а ширина різку і розмір зони термічного впливу – більшими. Такий же підхід необхідний при виборі оптимального типу газу.

При газолазерній різці неперервним випромінюванням, розмірні параметри різку менш критичні щодо точності фокусування випромінювання на оброблюваній поверхні. Найбільша глибина і мінімальна ширина різку досягається при розміщенні поверхні заготовки в зоні навколо фокальної площини (при фокусній відстані системи  $F=100$  мм розмір зони термічного впливу -  $\pm 1$ мм).

На розмірні параметри і якість різку впливає модовий склад випромінювання (розмір плями фокусування). Зі збільшенням порядку моди – спостерігається зниження шорсткості поверхні різку. В той же час, зниження порядку моди дає можливість зменшити розмір фокальної плями, тобто збільшити потужність випромінювання і зменшити ширину різку.

#### г) Точність різки

Точність різки покращується при зменшенні швидкості обробки. Похибка розсіювання при різці лазерним випромінюванням складає біля  $8 \div 10\%$  від заданих параметрів різку.

#### д) Вибір оптимальних режимів різки

Оптимальні режими вибирають на основі математичних залежностей, отриманих на базі багатофакторних експериментів. Найбільш суттєвим фактором при цьому – є потужність лазера, швидкість різки та тиск робочого газу.

### §2.2.2. Різка неметалевих матеріалів

До неметалевих матеріалів відносять: склотканини, синтетичні тканини, кераміка, деревина, штучна шкіра, пластмаса, папір, та ін..

В зоні лазерного впливу, при обробці таких матеріалів, спостерігається локальний процес горіння, хоча в деяких випадках (при обробці склотканин та кераміки) основним механізмом руйнування є плавлення матеріалу. Для

розплавлення неметалевих матеріалів, необхідна питома енергія випромінювання становить  $1\div 2$  кДж/см<sup>3</sup>. Крім цього, неметалеві матеріали мають набагато меншу теплопровідність ніж металеві, тому при підведенні лазера до поверхні матеріалу має місце висока локалізація енергії, що визначає можливість високих швидкостей якісної різки.

Розглянемо основні параметри процесу різки неметалевих матеріалів.

а) Ширина різку

Даний параметр, в основному визначається швидкістю обробки. При постійному рівні потужності, збільшення швидкості призводить до зменшення ширини різку. Ширина різку також залежить від товщини матеріалу і від типу оброблюваного матеріалу.

На ширину різку впливає також положення оброблюваної поверхні  $\Delta l$ . Найменша ширина різку має місце при розміщенні фокальної площини на деякій відстані  $-\Delta F$  відносно оброблюваної поверхні (близько 1мм).

б) Глибина різку

даний параметр є залежним від густини потужності випромінювання, швидкості різки, виду і тиску робочого газу. Зі збільшенням потужності випромінювання – зростає глибина різку. При заданій потужності випромінювання (для кожного виду матеріалу) існує оптимальна швидкість при якій глибина різку буде максимальною.

При різці неметалевих матеріалів (особливо горючих), використання кисню – як робочого газу, як правило – недоцільно, тому використовують зжатє повітря, аргон, азот при тиску  $P=0,2\div 0,25$  МПа (див. рис.13).

Максимальна глибина досягається при заглибленні фокальної площини в матеріал ( $-\Delta F$ ).

В багатьох випадках, глибина різку визначає кількість шарів матеріалу в пакеті чи настилі, який ріжеться (10÷15 шарів).

в) Якість і точність різку

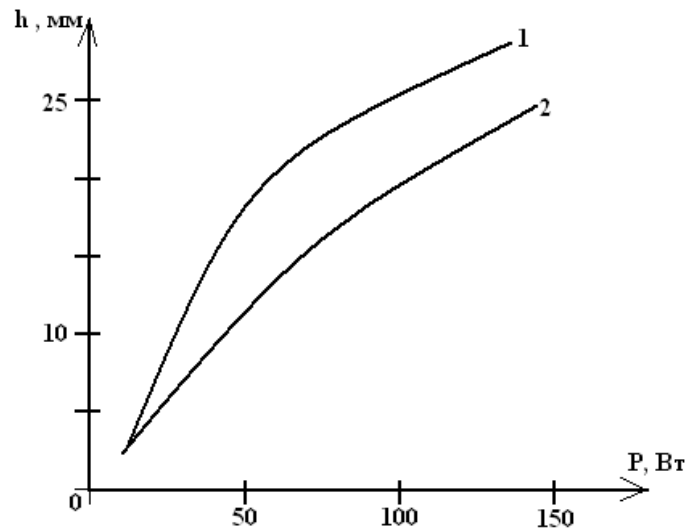


Рис.13. Залежність глибини різки від потужності випромінювання: 1 – процес, коли використовується газ; 2 – без використання робочого газу

Якість різки для неметалевих матеріалів, зазвичай, оцінюється за зовнішнім виглядом. При обробці синтетичних тканин, склотканин та інших подібних матеріалів – краї різки дещо оплавляються, що фіксує форму виробу, попереджає «розпускання» матеріалу. Товщина дефектного шару при цьому становить  $\pm 1$  мм.

Для якісного розкроювання діелектричних і текстильних матеріалів, доцільно передбачати охолодження матеріалу і видалення продуктів горіння.

Охолодження проводять газом (повітря, аргон), що подається співвісно з випромінюванням (див. вище рис.12). за допомогою другого контуру сопла забезпечується відкачка продуктів горіння із зони обробки.

При товщині матеріалу – більше 1 мм, точність різки оцінюється за клиновидністю. Найбільшою мірою на цей параметр впливає швидкість обробки – з збільшенням швидкості обробки клиновидність зростає.

#### г) Вибір режимів обробки

Для різки неметалевих матеріалів вибір режимів обробки є аналогічним до випадку різки металевих матеріалів (див. §2.2.1 пункт д. ).

### §2.2.3. Інтенсифікація процесу різки неперервним випромінюванням

Щоб інтенсифікувати процес різки лазерним випромінюванням, необхідно дотримуватись наступних умов:

- 1) правильний вибір робочого газу: можна використовувати суміш кисню та інертного газу;
- 2) підведення електричної дуги в зону лазерного впливу – підвищує швидкість різки (для металевих матеріалів). Для утворення дуги застосовують електрод, що розташовується під кутом до напрямку руху заготовки з нижнього боку заготовки (подібно до схеми зображеної на рис.6);
- 3) правильне використання оптичних особливостей лазерного випромінювання (використання еліптично – поляризованого випромінювання);
- 4) правильний вибір режиму швидкості обробки. На цьому принципі працює адаптивна система автоматичного управління, що дозволяє стабілізувати умови процесу.

## **Розділ 3. Лазерне скрайбування та терморозколювання крихких матеріалів**

Для розділення крихких і твердих матеріалів (скла, кераміки, напівпровідників), лазерне випромінювання можна використовувати більш ефективно. При реалізації процесів розділення немає необхідності весь об'єм різку в матеріалі приводити в розплавлений або випарений стан і таким чином – витратити значну кількість енергії на обробку. Замість цього, створюючи за допомогою лазерного випромінювання особливий напружений деформований стан, для розділення цих матеріалів, можна використовувати їх основну властивість – крихкість.

### § 3.1. Лазерне скрайбування

Суть технології полягає в нанесенні направляючої подряпини (порізу) – вздовж якої, при незначному зусиллі, відбувається розділення крихкого матеріалу.

Перевагами лазерного скрайбування є :

- висока швидкість скрайбування (15м/хв.);
- можливість отримання великої глибини порізу ( в 2÷3 більша, ніж при алмазному скрайбуванні);
- безконтактність обробки, що означає – відсутність небажаного руйнування матеріалу (по краях розділеного матеріалу);
- висока якість скрайбування.

Глибина порізу залежить від властивостей матеріалу та режимів обробки. Для забезпечення наступного легкого розділення матеріалу, оптимальна глибина порізу має складати 25÷35% товщини матеріалу (див. рис.14).

В ряді випадків, для розділення матеріалу достатньо виконати лише серію не наскрізних отворів вздовж лінії розділення (в залежності від властивостей і товщини матеріалу).

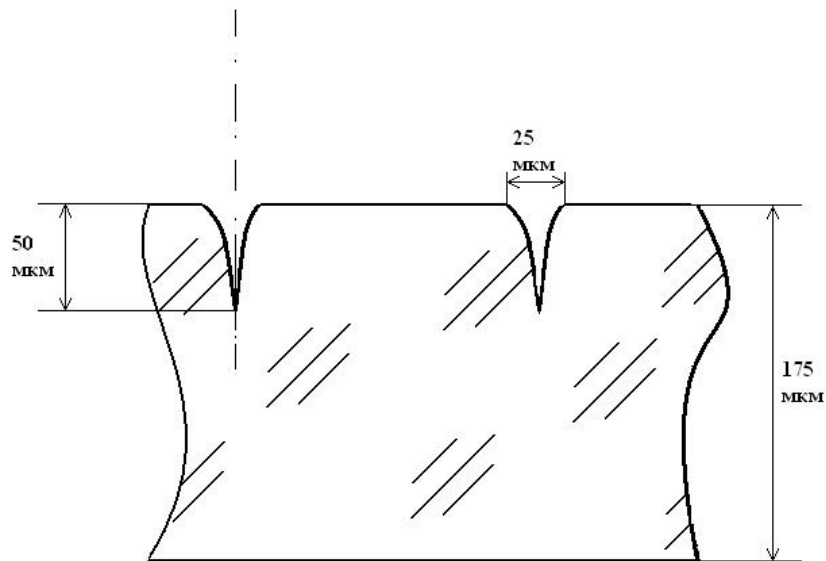


Рис.14. Глибина та ширина порізу, необхідні для легкого розколювання даного зразка матеріалу заданої товщини

Для скрайбування використовують газові CO<sub>2</sub> – лазери, або твердо тільні YAG – лазери, а також лазери, що працюють в імпульсному режимі з високою частотою подачі імпульсів .

### §3.2. Терморозколювання матеріалу

При реалізації цього процесу в матеріалі створюються локальні термічні напруження, вздовж потрібної лінії розділення, які призводять до напрямленого руйнування матеріалу. Величина напруження визначається за наступною формулою:

$$\sigma = \frac{\beta ET}{2(1 - \mu)}$$

де  $\beta$  – лінійний коефіцієнт термічного розширення;  $E$  – модуль пружності;  $T$  – температура в зоні лазерного впливу;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона.

Значення цих термостійких напружень в 4÷6 разів перевищують межу міцності крихкого матеріалу. при високій локалізації лазерного випромінювання, необхідна порівняно невелика потужність для ініціювання руйнування матеріалу (для скла – 25 Вт). Потужність вибирається в залежності від швидкості переміщення заготовки (див. рис.15).

В зоні впливу лазерного випромінювання в ряді випадків можуть виникати дуже високі градієнти температур і напруження. Тому іноді їх

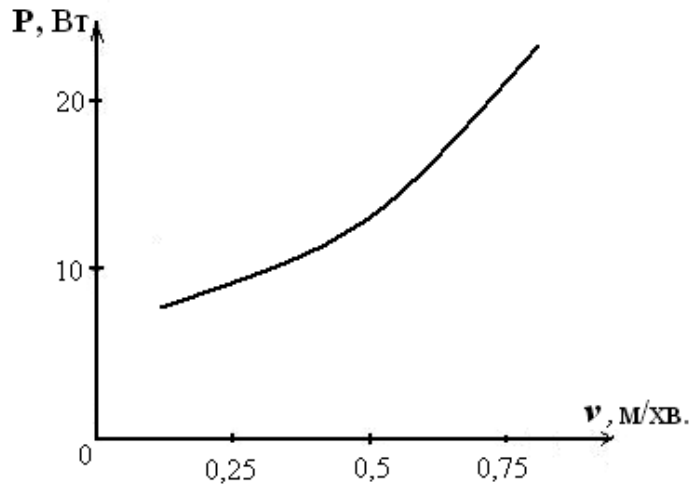


Рис.15. Характеристика необхідної потужності випромінювання зі зміною швидкості переміщення заготовки

необхідно зменшувати попереднім підігрівом заготовки.

### §3.3. Области застосування та типові процеси

Основними областями застосування та відповідні їм типові процеси є:

- 1) розкроювання металевого листового матеріалу;
- 2) виготовлення виробничих штампів (пресів для виготовлення заготовок);
- 3) мікрообробка – виготовлення щілин і пазів, якщо товщина заготовки велика, то використовують імпульсне випромінювання з високою частотою імпульсів, якщо ж товщина мала – неперервне випромінювання: вирізування вікон, виготовлення деталей з слюди (лазер «зварює» по краях слюди), отримання Г-подібної конфігурації пазів, виготовлення гібридних інтегральних схем;
- 4) скрайбування і терморозколювання крихких матеріалів (в мікроелектроніці кристалів), для розділення товстостінних виробів із скла;

- 5) розкroювання неметалевих матеріалів – целюлози, пластик і таке ін..

### §3.4. Обладнання для різки лазерним випромінюванням

Обладнання для різки лазерним випромінюванням поділяють на дві групи:

- a) установки на базі твердотільних лазерів – використовуються для прецизійної різки, отримання точних щілин, пазів, різів ,для ряду операцій скрайбування і терморозколювання. Зазвичай такі установки працюють в імпульсному режимі (КВАНТ 1,2,3...);
- b) установки на базі газових лазерів – значно підвищують продуктивність обробки і зазвичай, працюють в неперервному режимі. На базі газових лазерів випускають устаткування типу ЛАЗЕР-ПРЕС.



## **Розділ 4. Лазерне зміцнення (усталення, закалювання) поверхні**

Ефект зміцнення при лазерному впливі на металеві матеріали спостерігається внаслідок надвисоких швидкостей нагріву і наступного охолодження опроміненого матеріалу, часткового легування поверхневого шару елементами навколишнього середовища, зростання щільності дислокацій в зоні опромінення та ін..

В опроміненому матеріалі за таких умов відбуваються структурні зміни і фазові перетворення, що супроводжуються утворенням специфічної ультрадисперсійної гомогенної структури з винятковими властивостями. В залежності від ступеня розвитку зазначених процесів, розрізняють наступні види лазерного зміцнення матеріалу:

### 1) Зміцнення без фазового перетворення

$q=10^3 \div 10^4$  Вт/см – густина потужності,

$v_{ох}=10^4 \div 10^5$  C°/сек – швидкість охолодження.

Розмір усталеного шару при такому виді зміцнення становить  $h=0,02 \div 0,5$  мм. Таке зміцнення передбачає структурні зміни в матеріалі при такому рівні густини потужності випромінювання, який ще не призводить до розплавлення опроміненої зони. При цьому зберігається початкова шорсткість оброблюваної поверхні.

### 2) Зміцнення із фазовим переходом

$q=10^4 \div 10^5$  Вт/см,  $v_{ох}=10^4 \div 10^6$  C°/сек.,  $h=0,02 \div 3$ мм.

Таке зміцнення передбачає плавлення матеріалу в опроміненій зоні. Цей вид зміцнення вимагає більш високої густини потужності, плавлення матеріалу, зумовлює порушення початкової шорсткості поверхні.

При використанні перших двох видів зміцнення, не вимагається наявність спеціального середовища, так як обробка проводиться у повітрі. При цьому можлива дифузія складових повітря в оброблювану зону.

3) При лазерному легуванні, для насичення поверхневого шару легуючим елементом, необхідно використовувати спеціальне середовище – газоподібне, рідке, тверде:

$$q=10^4\div 10^6 \text{ Вт/см}, v_{ox}=10^4\div 10^6 \text{ }^\circ\text{C/сек.}, h=0,2\div 2\text{мм} - \text{глибина легування.}$$

В результаті – на оброблюваній поверхні утворюється новий сплав, який відрізняється за структурою і складом від матричного (початкового) матеріалу.

4) Лазерна плавка

$$q=10^4\div 10^6 \text{ Вт/см}, v_{ox}=10^4\div 10^6 \text{ }^\circ\text{C/сек.}, h=0,02\div 1\text{мм} - \text{розмір плавленого шару.}$$

Даний спосіб дозволяє нанести на поверхню оброблюваного матеріалу шар іншого матеріалу, що покращує експлуатаційні характеристики основного.

5) Аморфізація поверхні (в умовах швидкісного опромінювання – дуже коротким імпульсом або скануючим променем)

$$q=10^8\div 10^{10} \text{ Вт/см}, v_{ox}=10^6\div 10^{10} \text{ }^\circ\text{C/сек.}, h=0,01\div 0,1\text{мм} - \text{глибина термічного впливу.}$$

Надвисокі швидкості тепловідводу забезпечують специфічне «заморожування» розплаву – утворення «металевого скла» (метглас) ,або аморфного стану поверхневого шару. При аморфізації поверхні досягається висока твердість , корозійна стійкість, покращені магнітні властивості.

6) Шокове зміцнення

$$q=10^9\div 10^{12} \text{ Вт/см}, v_{ox}=10^4\div 10^6 \text{ }^\circ\text{C/сек.}, h=0,02\div 0,2\text{мм.}$$

Шокове зміцнення має місце за умов впливу на матеріал потужного імпульсу випромінювання, що призводить до виникнення імпульсу віддачі, який в свою чергу – зумовлює утворення ударної хвилі в матеріал.

#### §4.1. Зміцнення імпульсним випромінюванням

В основі 1-го та 2-го видів процесу зміцнення лежить - отримання елементарної зони лазерного впливу одиничним імпульсом. Завдяки

дискретності подачі енергії в зону обробки – створюються широкі можливості для точного управління процесом, тому доцільно використовувати зміцнення імпульсним випромінюванням для виконання прецизійних операцій.

Технологічні характеристики залежать від схем, параметрів випромінювання, швидкості, виду матеріалу та ін..

#### §4.1.1. Схеми обробки

При зміцненні імпульсним випромінюванням, фокусування може здійснюватися сферичною або циліндричною оптикою.

Розрізняють однокоординатне (лінійне) і двокоординатне зміцнення, які забезпечують при відносно дискретному або неперервному переміщенні деталі, або лазерного випромінювання.

При лінійному зміцненні швидкість обробки

$$v = \frac{L}{t} = \frac{nDk_n}{t} = Dk_n f ,$$

де  $L$  – довжина ділянки зміцнення;  $t$  – час обробки;  $n$  – кількість імпульсів;  $D$  – діаметр зони опромінення;  $k_n$  – коефіцієнт перекриття;  $f$  – частота подачі імпульсів.

При двокоординатній обробці, одним із основних параметрів – є крок обробки  $S$  (крок відносного переміщення вздовж вісі  $x$  –  $S$ , вздовж вісі  $y$  –  $S'$ ). Від співвідношення  $S/S'$  залежить ступінь заповнення профілю (яка частина площі від загальної площі заготовки є зміцненою). Можливі 4 схеми реалізації обробки (за допомогою сферичної оптики див. рис.16)

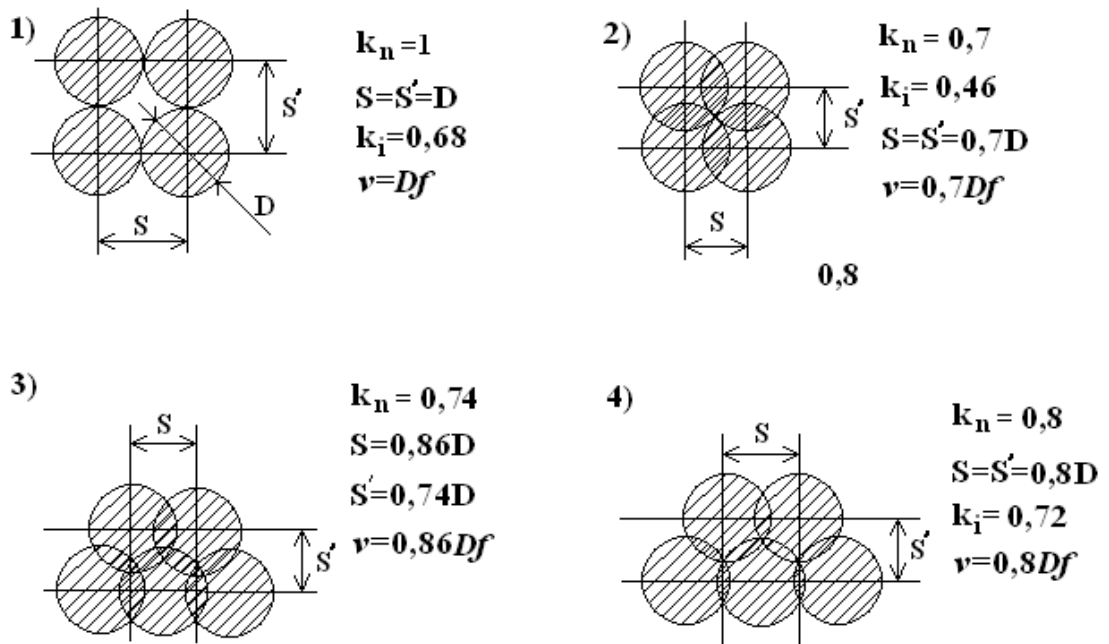


Рис.16. Схеми реалізації обробки

Для оцінки ефективності реалізації наведених схем можуть використовуватись показники:

- Коефіцієнт заповнення профілю

$$k_3 = \frac{F'}{F},$$

що означає ступінь заповнення профілю, що підлягає обробці, зонами лазерного впливу. В формулі  $F'$  – площа опроміненої поверхні,  $F$  – загальна площа заготовки. Потрібно, щоб кількість зон подвійного перекриття була як найменшою.

- Коефіцієнт використання імпульсів –  $k_i$

$$k_i = \frac{4F'}{\pi D^2}.$$

Коефіцієнт використання імпульсів описує відношення реальної площі опроміненої поверхні до максимальної теоретичної площі опромінення.

При реалізації обробки, дуже важливою характеристикою також є ступінь рівномірності розподілу зон лазерного впливу по глибині – по товщині шару з рівномірно зміненими властивостями (див. рис.17).

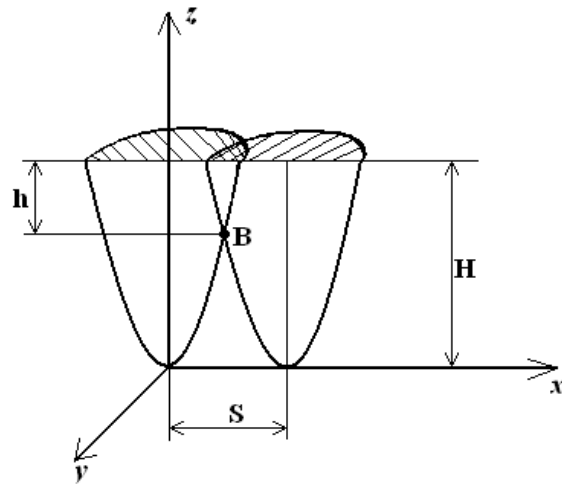


Рис.17. Розподіл зон лазерного впливу по об'єму матеріалу

При реалізації обробки, коли коефіцієнт перекриття менший одиниці ( $k_n < 1$ ) – глибина  $h$  буде визначатись положенням точки  $B$ , тобто перетином двох параболоїдів обертання.

При визначенні залежності для розрахунку оптимальних швидкостей і продуктивності процесу, необхідно враховувати, що реалізація методу двокоординатної обробки доцільно здійснювати шляхом «рядкового сканування», для чого необхідно забезпечити зворотно – поступальне відносне переміщення лазерного випромінювання по оброблюваній поверхні з швидкістю –  $v$ . Наприклад, для першої схеми обробки (рис.16)  $v = Df$ .

Продуктивність процесу двокоординатної обробки рівна площі опроміненої ділянки за одну секунду

$$\Pi = \frac{F'}{t} k_s = \frac{F}{t} ,$$

якщо взяти, що загальна площа заготовки  $F = F_0 n k_i$ , то продуктивність визначатиметься як:

$$\Pi = \frac{F_0 n k_i}{t} = F_0 k_i f = \frac{\pi D^2 k_i f}{4} ,$$

де  $F_0$  – площа одиничної зони лазерного впливу;  $n$  – кількість зон лазерного впливу.

Наведемо приклад для третьої схеми обробки (рис.16): якщо  $D=4$  мм,  $k_i=0,74$ ,  $f=1$  Гц – то продуктивність  $\Pi=557$  мм<sup>2</sup>/хв..

#### §4.1.2. Лазерне зміцнення з використанням циліндричної оптики

У випадку використання циліндричної оптики, форму зони впливу імпульсу можна представити у вигляді прямокутника з округленими кутами, при чому радіус округлення рівний половині ширини зони.

Лінійна обробка в цьому випадку являє собою послідовність таких зон, зміщених одна відносно одної на величину кроку –  $S_{ц}$  (див. рис.18).

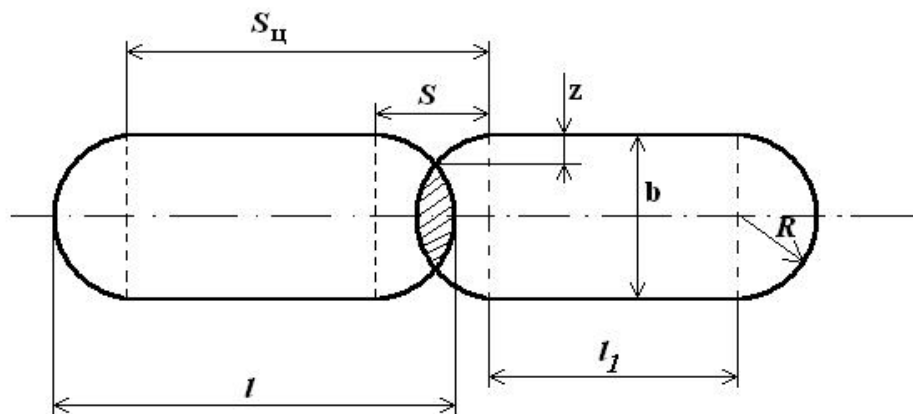


Рис.18. Зони впливу імпульсного лазерного випромінювання при використанні циліндричної оптики

$$S_{ц} = l_1 + bk_n, l_1 = l - b, k_n = \frac{S}{b}.$$

$S$  – відстань між двома найближчими центрами округлення двох сусідніх зон лазерного впливу. Враховуючи, що  $l_1 = l - b$  - крок лінійної обробки  $S_{ц}$  можна знайти, як

$$S_{ц} = (l - b) + bk_n = l - b(1 - k_n),$$

де  $l$  – довжина зони лазерного впливу.

швидкість виконання лінійної обробки може знаходитись як

$$v = S_{ц}f = f(l - b(1 - k_n)).$$

Продуктивність процесу лінійної обробки може бути визначена як площа опроміненої поверхні в одиницю часу

$$П = \frac{F}{t} = \frac{(l - b)bn + \frac{\pi b^2}{4} + \left(\frac{\pi b^2}{4} - F_n\right)(n - 1)}{t},$$

де  $n$  – кількість зон лазерного впливу або кількість імпульсів при подачі в кожен зону;  $F_n$  – площа перекритих ділянок зон лазерного впливу.

Якщо величина  $n$  – є великою, тоді продуктивність можна рахувати за спрощеною формулою

$$П \approx (lb - 0,21b^2 - F_n)f.$$

Порівняно із продуктивністю, що реалізується за допомогою сферичної оптики – продуктивність зміцнення циліндричною оптикою, при використанні подібного обладнання, є більш високою.

#### §4.1.3. Технологічні характеристики

а) Розмірні параметри: діаметр одиничної зони зміцнення, ширина стрічкового зміцнення, глибина зони зміцнення.

Ці всі параметри залежать від енергетичних параметрів випромінювання (густини потужності випромінювання -  $q$ ). При цьому, діаметр зони зміцнення рівний ширині зони лінійного (стрічкового) зміцнення. При збільшенні густини потужності – зростає і глибина зони лінійного зміцнення.

Підвищення ефективності зміцнення може бути досягнуте збільшенням поглинаючої здатності матеріалу.

Поглинаюча здатність збільшиться, якщо нанести на поверхню матеріалу спеціальне покриття (колоїдний розчин графіту) або за допомогою попередньої хімічної обробки опроміненої поверхні.

Глибина зміцнення залежить як від типу матеріалу (марки сталі), так і від виду покриття.

б) Ступінь зміцнення – залежить від типу матеріалу і від початкового стану поверхні.

Існує 3 типи матеріалу при процесі лазерного зміцнення:

1 тип – початковий матеріал (який не піддавався лазерному впливу);

2 тип – зміцнений матеріал (який піддався однократному опроміненню);

3 тип – відпущений матеріал (який попав у зону перекриття зон лазерного впливу).

Оптимальний коефіцієнт перекриття  $k_n$  має бути  $k_n > 0,2$  – це буде відповідати максимальним розмірам зміцненої ділянки.

При оцінці ступеня зміцнення слід враховувати глибину рівномірно зміцненого шару –  $h$ . Зі зростанням коефіцієнта перекриття спостерігається зменшення цього шару, при чому ступінь цього зменшення залежить і від густини потужності випромінювання.

Для отримання максимальної товщини рівномірно зміцненого шару –  $h_{max}$ , обробку слід проводити з коефіцієнтом перекриття  $k_n < 0,6$  і підвищених рівнях густини потужності випромінювання.

в) Шорсткість

Нерівності зміцненої поверхні виникають в результаті часткового випаровування матеріалу при опроміненні з густиною потужності – близькою до порогової (щоб почався процес плавлення, але ще не випаровування), внаслідок зміни об'єму при структурних перетвореннях під впливом різних гідродинамічних ефектів на розплав, в зоні лазерного впливу. Оцінка висоти цих нерівностей необхідна для визначення припуску для подальшої обробки матеріалу.

Вид схеми суттєво впливає на мікрорельєф оброблюваної поверхні.

Мінімальне значення параметра шорсткості характерне для першої схеми (рис.16), коли  $k_n=1$ ; максимальне значення  $R_z$  приймає для 3, 4-ї схем – тобто залежить від коефіцієнта перекриття.

Окрім коефіцієнта перекриття, на висоту мікронерівностей впливає зміна густини потужності випромінювання в фокусі оптичної системи.



Мінімальне значення  $R_z$  досягається при невисоких густинах потужності випромінювання ( $q=5\div 10^4$  Вт/см<sup>2</sup>).

#### г) Вибір режимів

Одним із найважливіших параметрів процесу зміцнення імпульсним лазерним випромінюванням – є коефіцієнт перекриття  $k_n$ , або крок обробки.

На вибір цього параметра впливає ряд обмежень:

- розмір зміцненої і не зміцненої зон;
- шорсткість зміцненої поверхні;
- товщина рівномірно зміцненого шару;
- продуктивність процесу.

Існує оптимальне значення параметра  $k_n$  – при якій всі обмежуючі фактори витримуються в допустимих межах –  $k_n^{opt}=0,8$ .

#### §4.2. Зміцнення неперервним випромінюванням

При використанні неперервного лазерного випромінювання, можливості процесу зміцнення суттєво розширюються: в першу чергу – підвищується продуктивність обробки, що дозволяє зміцнювати великі ділянки крупно габаритних деталей.

Технологічні характеристики залежать від схем обробки (рис.19), властивостей оброблюваного матеріалу, енергетичних параметрів випромінювання, швидкості обробки та ін..

Схема 1 – одностороннє зміцнення (одно координатна обробка). Застосовується така схема при значній протяжності і невеликій ширині робочої поверхні:  $v$  – швидкість переміщення,  $B$  – ширина доріжки зміцнення.

Схема 2 – одно координатна обробка, при якій на поверхні отримують декілька доріжок без перекриття – паралельно або послідовно:  $n$  – кількість доріжок.

Схема 3 – доріжки зміцнення отримуються із взаємним перекриттям:  $k_n$  – коефіцієнт перекриття.

Друга і третя схеми використовуються для зміцнення великих ділянок поверхні.

Схема 4 – сканування випромінюванням або суміщення коливань

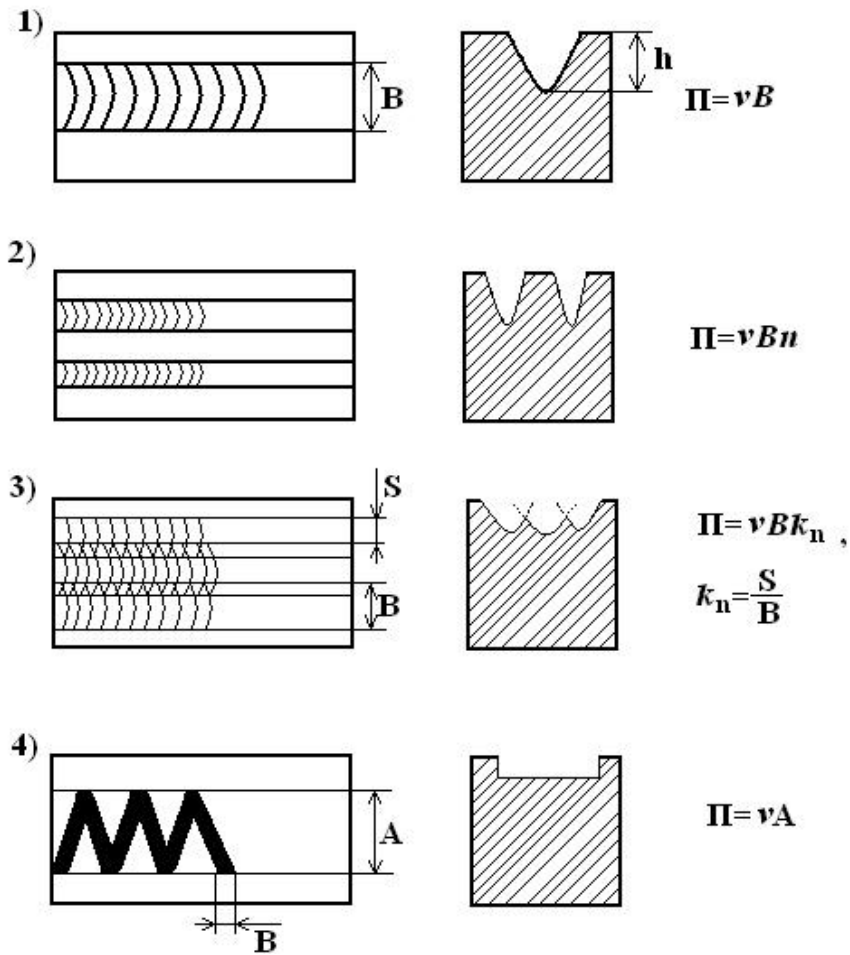


Рис.19. Схеми обробки неперервним випромінюванням

випромінювання з амплітудою  $A$  і перпендикулярному до них зміщенні оброблюваної поверхні.

§4.2.1. Закономірності процесу зміцнення неперервним випромінюванням

Технологічними параметрами процесу лазерного зміцнення є:

- ширина доріжки;
- площа зміненої зони;
- глибина зміцнення;
- ступінь зміцнення;

е) шорсткість оброблюваної поверхні.

Ці параметри залежать від густини потужності випромінювання, швидкості обробки, виду оброблюваного матеріалу, характеристик поглинаючого покриття.

#### Зона термічного впливу

Зона термічного впливу представляє собою область, яка складається зазвичай з 2÷4 шарів. Кількість шарів визначається, в першу чергу – режимами обробки.

В центральній частині зони, зазвичай, міститься так званий білий шар. Кожен з шарів відрізняється мікроструктурою і твердістю (твердість першого (верхнього) шару є максимальною).

Зі збільшенням швидкості обробки – кількість шарів зменшується, зі збільшенням густини потужності випромінювання –  $q$  - зростає глибина зони термічного впливу, відповідно – зростає кількість шарів. Зі зростанням швидкості відносного переміщення випромінювання і оброблюваної поверхні – знижується як ширина, так і глибина зміцненої зони, що пояснюється зменшенням питомої енергії випромінювання, яка підводиться до зони лазерного впливу.

Збільшення швидкості обробки також впливає на зміну мікротвердості зміцненого шару: зі збільшенням швидкості обробки з 0,5 до 0,6 м/хв. – мікротвердість зростає з 3000 до 4000 МПа.

Шорсткість зростає з ростом густини потужності випромінювання. При малих швидкостях обробки – шорсткість обробленої поверхні буде максимальною, а при збільшенні швидкості - шорсткість зменшується.

Оскільки ефект зміцнення досягається при само охолодженні матеріалу і швидкому відведенні поглинутого тепла в холодний масив матеріалу деталі, то необхідно знати граничні значення товщини матеріалу -  $\Delta_{гр}$  . Зі збільшенням  $\Delta_{гр}$  – глибина зони термічного впливу зменшується (чим товстіший матеріал, тим менша глибина ЗТВ). Від товщини матеріалу -  $\Delta$  залежить мікротвердість в зоні нагріву: зі зростанням  $\Delta$  - мікротвердість

зростає і стає максимальною при товщинах матеріалу, що перевищують значення  $\Delta_{гр}$ . Розміри зони термічного впливу залежать від типу і глибини поглинаючого покриття. Оптимальна товщина поглинаючого покриття -  $20\div 50$  мкм.

#### §4.2.2. Вибір режимів обробки

При виборі режимів обробки керуються експериментальними залежностями, що розроблені для конкретних умов реалізації процесу або для розрахунку деяких параметрів використовують теоретичні закономірності.

При виборі режиму зміцнення актуальною задачею є аналітичне визначення глибини зміцненого шару, при заданих умовах опромінення; оцінка оптимальної тривалості впливу на матеріал (швидкість обробки).

Розрізняють наступні завдання які слід зробити для вибору режиму обробки:

- 1) розв'язати рівняння теплопровідності, при цьому температура обробки повинна знаходитись в межах  $T_{закал.} < T_{обробки} < T_{пл.}$ , в залежності від цих температур знаходять інтервал потужностей випромінювання;
- 2) розраховують ізотерми для визначеної температури обробки;
- 3) обчислюють максимальні розміри зони зміцнення (глибину і ширину зони зміцнення);
- 4) із знайденого інтервалу потужностей визначають інтервал швидкостей обробки.

#### §4.2.3. Лазерне легування і наплавлення матеріалу

Це один з видів лазерного зміцнення, при якому підвищення твердості та інших експлуатаційних характеристик поверхневого шару матеріалу досягається не тільки за рахунок фазових і структурних перетворень в зоні лазерного впливу, а й за рахунок створення нового сплаву, що відрізняється

від матричного за хімічним складом. Як правило – в основі нового сплаву лежить матричний матеріал

При лазерній наплавці, на відміну від легування, матричний матеріал може знаходитись лише в невеликому шарі – між матрицею і наплавленим елементом, і виступає в якості зв'язуючого середовища. Наплавлений шар може суттєво відрізнитися від матричного матеріалу.

Існують наступні способи подачі легуючого середовища в зону обробки:

- 1) нанесення легуючого складу у вигляді порошку;
- 2) обмазка оброблюваної поверхні легуючим складом;
- 3) накочування фольги із легуючого матеріалу на оброблювану поверхню (із подальшим лазерним впливом);
- 4) легування в рідкому легуючому середовищі;
- 5) легування в газоподібному легуючому середовищі;
- 6) утримання легуючих елементів магнітним полем на матричній поверхні;
- 7) електро – іскрове нанесення легуючого складу;
- 8) плазменне нанесення покриття;
- 9) електролітичне осідання легуючого покриття;
- 10) подача легуючого складу в зону обробки, синхронно із лазерним випромінюванням.

§4.2.3.1. Технологічні закономірності процесів лазерного легування та наплавки

Розрізняють наступні розмірні параметри оброблюваної поверхні:

- 1) ширина (площа) легування;
- 2) глибина (товщина) плавленого шару;
- 3) ступінь зміцнення (мікротвердість);

До технологічних параметрів належать:

- 1) продуктивність;
- 2) шорсткість поверхні.

Додатковим технологічним параметром, що оцінює якісь процесу лазерного легування може бути – концентрація легуючого елементу в матричному матеріалі.

### Розмірні параметри

Важливу роль, при впливі на розмірні параметри, відіграє енергія і кількість імпульсів, що подаються в одну і ту ж зону обробки:

якщо маємо кількість імпульсів  $n=1$  при величині енергії випромінювання  $E=8$  Дж, то отримаємо глибину зони легування  $h=120$  мкм; при  $n=3$  і  $E=10,5$  Дж глибина зони легування  $h=180$  мкм.

При легуванні неперервним випромінюванням, розміри зони залежать від швидкості обробки (тривалості впливу випромінювання). При збільшенні швидкості обробки – глибина і ширина зони легування зменшується, але при цьому підвищується концентрація легуючого елементу.

Імпульсне випромінювання забезпечує менші розміри легованої зони ніж неперервне: при імпульсному випромінюванні – розмір легованої зони складає  $0,4 \div 0,7$  мм, в той час як при неперервному -  $1 \div 2$  мм.

### Ступінь зміцнення

Ступінь зміцнення в першу чергу залежить від виду легуючого елементу і властивостей матричного матеріалу (див. рис.20 ).

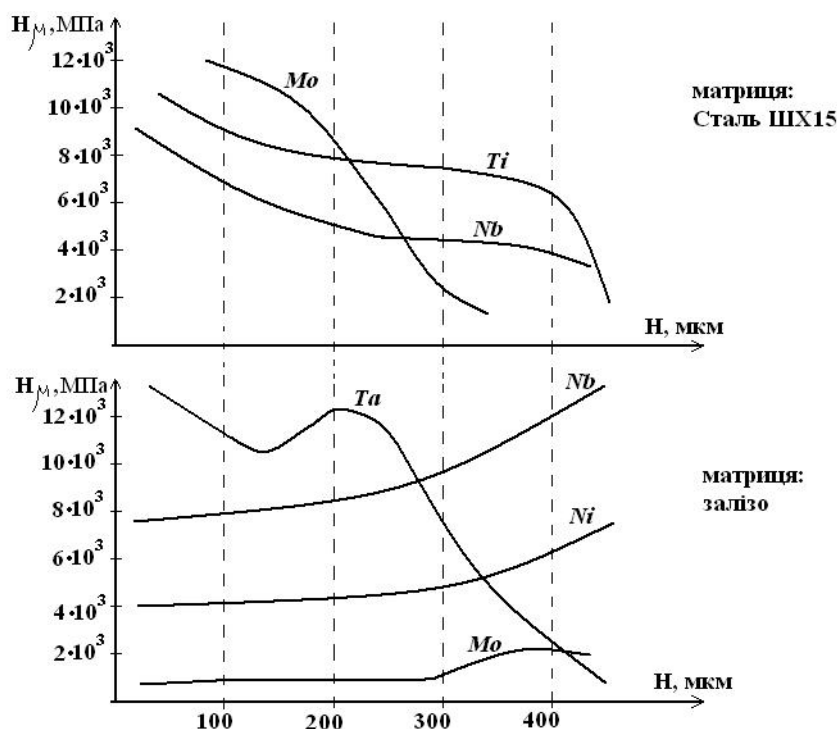


Рис.20. Залежність мікротвердості поверхні- $H_s$  від глибини зони термічного впливу- $H$ , при різних матрицях

### Концентрація легуючого елементу

В умовах лазерного легування, для ряду систем, можна отримати різноманітні метастабільні фази і структурні стани.

Розподіл легуючого елементу має бути строго локалізованим границями зони лазерного впливу і легуючі елементи не повинні проникати за межі цієї зони. Таким чином можемо визначити максимальну концентрацію легуючого елементу в опромінюваній зоні:  $K_1$  – концентрація,  $V_1$  – об'єм шару,  $K_2$  – концентрація легуючих елементів в розплавленому об'ємі матриці,  $V_2$  – об'єм розплавленого матеріалу.

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{V_1 + V_2}{V_2} \Rightarrow K_2 = \frac{K_1 V_2}{V_1 + V_2} .$$

Наприклад, для випадку однодоріжкової обробки поверхні (рис.19 схема 1) при відомій товщині легуючого покриття -  $h_n$  і глибині легованого шару –  $h$

$$K_2 = \frac{K_1 3h_n}{3h_n + 2h} .$$

Зі збільшенням енергії імпульсів, ростом кількості імпульсів або ростом потужності неперервного випромінювання – збільшується глибина легування, а відповідно і об'єм розплавленого матеріалу, тому в таких випадках концентрація легуючого елементу падає – зменшується мікротвердість зони обробки.

Зі збільшенням швидкості обробки також збільшується концентрація легуючого елементу, що пояснюється зменшенням глибини зони термічного впливу в цих умовах.

#### §4.2.4.Топографія поверхні

Оцінювання топографію поверхні стандартним параметром шорсткості не завжди вдається, оскільки по параметру  $R_z$  – шорсткість перевищує 300

мкм. Такі високі значення нерівностей зв'язані з тим, що оброблений шар матеріалу представляє собою переплавлений матеріал.

Зі збільшенням швидкості обробки, для даних умов (певної густини потужності випромінювання) хвилястість поверхні можна зменшити і вийти на режим «вирівнювання». Такий режим реалізується при скануванні випромінюванням. Зазвичай, після легування, необхідно проводити операцію фінішної обробки (операція абразивного доведення).

Для попередження можливих дефектів (мікротріщин, пор...) вибирають оптимальні режими, використовується попередній і наступний нагрів виробу.

#### §4.3. Експлуатаційні показники зміцнених матеріалів

Лазерна обробка впливає, в першу чергу, на такі показники: зносостійкість; теплостійкість; залишкова напруга в поверхневому шарі; механічні характеристики матеріалу – ці параметри визначають технічні якості контактуючих поверхонь, надійність і довговічність виробів.

Зносостійкість поверхні залежить від її мікротопографії, що зумовлене специфікою лазерної обробки. Використання поглинаючих покриттів сприяє покращенню технічних властивостей поверхні. Підвищення зносостійкості має місце внаслідок значного зменшення коефіцієнта тертя. Однією з найважливіших переваг лазерного зміцнення – є відсутність деформації матеріалу після обробки.

Теплостійкість (термостійкість) – збереження або зміна твердості та інших механічних властивостей при високих температурах, а також при повторному нагріванні та охолодженні.

Залишкові напруги – в матеріалі, зміцненим лазерним випромінюванням, спричиняється нерівномірність температурного впливу, утворенням, під час нагрівання або охолодження, нових структур з іншою густиною, наявністю включень, тощо. Величина і знак цих напруг залежать від густини потужності випромінювання, виду матеріал та умов обробки.



Так, при малих значеннях густини потужності випромінювання, коли матеріал нагрівається до температури, що нижча від температури плавлення, в поверхневому шарі розвиваються доволі високі розтягуючі напруги, і область їх розширення спів розмірна з глибиною зони термічного впливу. Збільшення густини потужності випромінювання –  $q$  призводить до появи на поверхні тонкого вплавленого оплавленого шару, що в свою чергу, призводить до зниження розтягуючі напруг і вирівнюванні їх за глибиною. При подальшому зростанні  $q$  – відбувається інтенсивне плавлення матеріалу, і залишкові напруги в поверхневому шарі змінюють знак, тобто з'являються стискаючі напруги, в глибині зміцненого шару зростають розтягуючі напруги. Якщо величина цих напруг перевищує межу міцності, то спостерігається утворення тріщин.

§4.4. Способи покращення експлуатаційних показників зміцнення лазерним випромінюванням (як неперервним, так і імпульсним)

Спосіб 1 – сполучення лазерної обробки з впливом криогену на оброблюваний матеріал (деталь поміщається в середовище рідкого азоту, що призводить до швидкого охолодження – підвищення мікротвердості).

Спосіб 2 – сполучення лазерного зміцнення з локальною пластичною деформацією (одночасне переміщення променя і розкручуючого ролика чи кулі. Прикочування швидко остигаючого шару таким інструментом, знижує шорсткість і підвищує мікротвердість поверхні).

Спосіб 3 – сполучення лазерного впливу з ультразвуковим зміцненням матеріалу.

§4.5. Области застосування лазерного зміцнення

1. Зміцнення інструментів і штампувального устаткування.
2. Зміцнення деталей машин і приладів.

#### §4.6. Обладнання для лазерного зміцнення

Вид 1. Установки на основі твердо тільних лазерів включають в себе джерело живлення, саму установку (випромінювач, фокусуючи система, система спостереження), робочий стіл, система охолодження. Продуктивність таких систем може складати 900 мм<sup>2</sup>/хв..

Вид 2. Установки на базі газових лазерів. Технологічний модуль таких установок складається з оптичного блоку , блоку управління, системи захисту, вимірювача потужності і пристрою для закріплення і переміщення заготовок.

## Розділ 5. Лазерне зварювання

Високі температури, що розвиваються в зоні лазерного впливу, локалізація теплових процесів, можливість швидкого розплавлення матеріалів - є передумови застосування лазерного випромінювання для реалізації процесів зварювання. При цьому можливе виконання двох видів зварювання – точкового і шовного.

Точкове зварювання реалізується імпульсним лазерним випромінюванням, а шовне зварювання можна проводити як імпульсним випромінюванням, при послідовному накладанні зон лазерного впливу із певним коефіцієнтом перекриття, так і неперервним випромінюванням.

### §5.1. Точкове зварювання

Точковим зварюванням сполучають тонкі листові матеріали, товщина яких  $h=0,5\div 2$  мм, проволоки до підложки, тонкі листи до масивних елементів (див. рис.21).

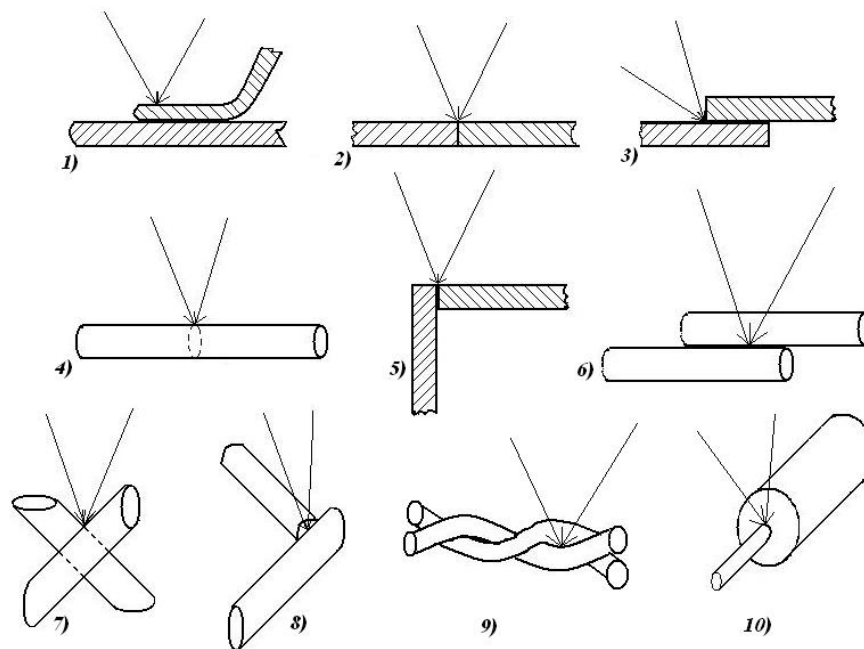


Рис.12. Типи з'єднань при точковому зварюванні

Імпульсне випромінювання дозволяє отримати зону розплавленого матеріалу із заданими розмірами. Тому розмірні параметри зварювальної ванни (глибина, ширина і форма), якість зварювання та продуктивність є

основними технологічними характеристиками, що визначають можливість процесу точкового зварювання.

На ці технологічні параметри впливають: густина потужності випромінювання, тривалість і енергія імпульсу, форма імпульсу, властивості зварювальних матеріалів, середовища в якому відбувається зварювання.

Розміри зварювальної ванни – глибина та діаметр проплавлення, які визначають міцність зварювального з'єднання, залежать від енергії, що витрачається на нагрівання, часу та інтенсивності лазерного впливу. зі збільшенням енергії зростають як глибина, так і діаметр зварювальної ванни (див. рис.22)

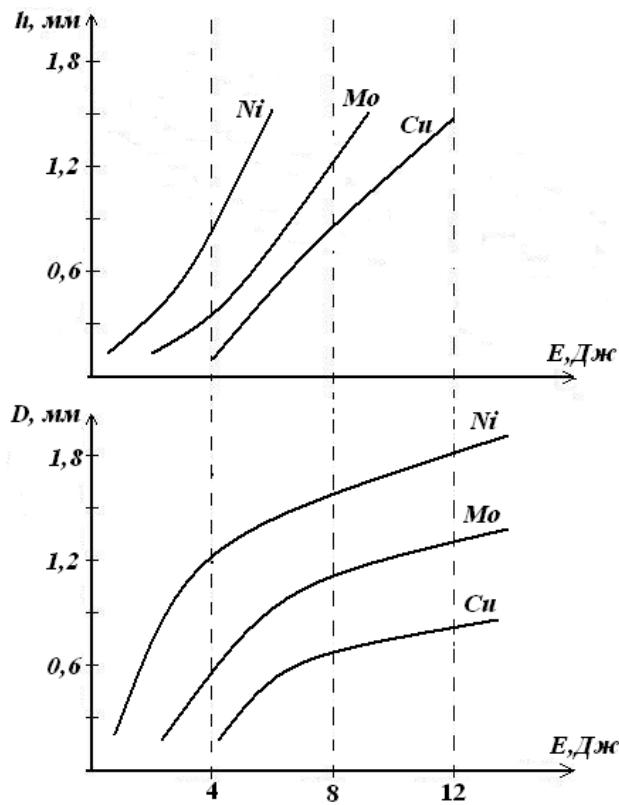


Рис.22. Залежність глибини зварювання  $h$  та діаметра  $D$  проплавлення від енергії та матеріалу.

Різниця розмірних параметрів зварювальної ванни для різних матеріалів визначається неоднаковістю їх теплофізичних характеристик.

При імпульсному зварюванні густина потужності повинна перевищувати величину, при якій, за час імпульсу  $\tau$  на поверхні матеріалу досягається температура плавлення, але в той самий час, це значення густини потужності енергії випромінювання не повинно перевищувати величини, при якій спостерігається інтенсивне випаровування розплаву:

$$q_{пл} < q < q_{вип} .$$

Для точкового зварювання імпульсним випромінюванням, в залежності від виду зварюваних матеріалів, використовується діапазон густин потужності  $q=10^5 \div 10^6 \text{ Вт/см}^2$ , тривалість імпульсу при цьому  $\tau=2 \div 10 \text{ мсек}$  при діапазоні діаметра зварюваних точок  $D=0,1 \div 1,2 \text{ мм}$  та глибини  $h=0,03 \div 1,3 \text{ мм}$ .

Якість зварюваного з'єднання – визначається його міцністю, розмірами зони термічного впливу. Якість з'єднання, в першу чергу, визначається типом матеріалу.

Міцність зварюваного з'єднання залежить також від енергії зварювального імпульсу. При збільшенні енергії, міцність спочатку зростає, що пов'язано із збільшенням глибини і діаметра зони проплавлення, а потім – з початком випаровування міцність зменшується, оскільки зменшується площа зварювальної ванни. Зі збільшенням тривалості імпульсу – зростають розміри проплавленої зони, що призводить до збільшення міцності з'єднання, Крім того, якість зварювального з'єднання підвищується і за рахунок видалення із зони з'єднання нерозчинених газів, що знижує можливість утворення порожнистості після остигання матеріалу. Міцність з'єднання також залежить від величини зазору між зварюваними елементами – зі збільшенням зазору міцність зменшується, тому для підвищення якості з'єднання зазори не повинні перевищувати величини  $0,15h$  де  $h$  – товщина з'єднувального листа; якщо з'єднання відбувається «внапуск», то величина цього зазору може становити  $0,25h$  (див. рис.23).

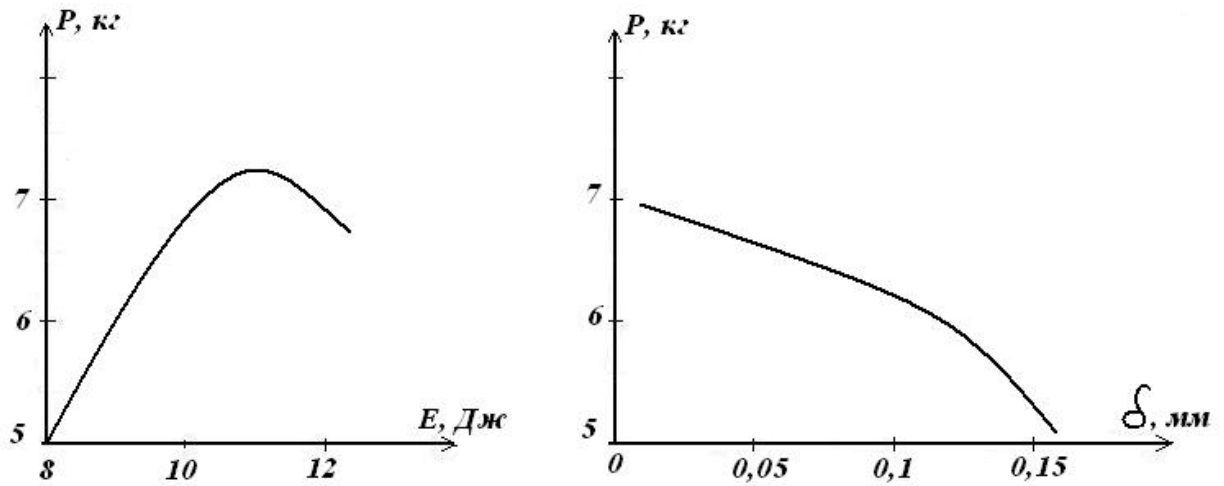


Рис.23. Залежність міцності від енергії випромінювання

Продуктивність точкового зварювання визначається частотою імпульсів  $f$ , якщо допоміжний час співрозмірний з інтервалом між імпульсами і якщо енергія імпульсу  $E=0,5\div 50$  Дж тоді частота  $f=150\div 1$ Гц і за таких умов продуктивність  $P=150$ точок/хв.

#### §5.1.1. Вибір режимів

Вибір режимів, як правило, здійснюється на основі експериментальних даних (додають енергію випромінювання  $E$ , тривалість імпульсу  $\tau$  вибирають певні розміри зварювальної ванни та задають тип з'єднання - знаючи їх, визначають міцність з'єднання для даного матеріалу).

Оцінку режимів можна виконати із використанням теоретичної закономірності зміни температури в зоні лазерного впливу:

$$T(x, t) = 2q_n \sqrt{\frac{a\tau}{k}} \left( \text{ierfe} \left( \frac{h}{4a\tau} \right) \right).$$

$T(x, t)$  – температура на відстані  $x$  від поверхні через час  $t$  після початку впливу теплового потоку з інтенсивністю  $q$ ;  $a$  – температуропровідність;  $k$  – теплопровідність;  $\text{ierfe}(\dots)$  – невизначений інтеграл імовірності похибок;  $h$  – необхідна глибина проплаву;  $\tau$  – тривалість імпульсу;  $q_n$  – поглинутий тепловий потік.

Для визначення густини потужності випромінювання необхідно врахувати коефіцієнт поглинання оброблюваного матеріалу.

### §5.1.2. Вдосконалення процесу точкового зварювання

1. Для матеріалів з високим коефіцієнтом відбивання на довжині хвилі робочого випромінювання (1,06 мкм) покращення поглинаючої здатності досягається нанесенням спеціального поглинаючого покриття.

2. Збільшення поглинаючої здатності за рахунок впливу на поверхню імпульсу з високою густиною потужності, після якого слідує робочий імпульс. Підвищення поглинаючої здатності під дією першого імпульсу досягається порушенням початкової шорсткості і видаленням оксидної плівки з поверхні матеріалу.

3. Підвищення якості зварювального з'єднання досягається проведенням процесу обробки в середовищі інертного газу (інертний газ перешкоджає реакції окиснення).

### §5.2. Шовне з'єднання

Шовне зварювання може здійснюватися як імпульсним, так і неперервним (частіше) випромінюванням.

#### §5.2.1. Шовне зварювання імпульсним випромінюванням

Швидкість зварювання залежить від розмірів елементарної зони лазерного впливу (діаметр зварювальної ванни при впливі одиничного імпульсу, від коефіцієнта перекриття і частоти подачі імпульсу).

$$v = k_n D f .$$

Глибина зварювального шва залежить від умов процесу, виду матеріалу, швидкості обробки, частоти чергування імпульсів та енергетичних параметрів випромінювання. Для збільшення продуктивності (швидкості) випромінювання фокусують в прямокутну чи овальну пляму.

#### §5.2.2. Шовне зварювання неперервним випромінюванням

Дана операція здійснюється ІФЧ випромінюванням  $\text{CO}_2$  – лазера, при рівнях потужності  $1 \div 1,5$  кВт.

Основним механізмом передачі тепла в глибок матеріалу – є теплопровідність. Глибина шва знаходиться в межах  $1 \div 2$  мм при однократному проходженні. При густині потужності випромінювання, що перевищує декілька кВт енергія подається швидше ніж її можна відвести механізмом теплопровідності, тому в матеріалі за рахунок випаровування прошивається отвір, крізь який енергія випромінювання подається в глибок матеріалу, тобто в цьому випадку можна подавати енергію на більшу глибину – реалізується **кінджальне** проплавлення. При переміщенні випромінювання отвір заповнюється розплавом.

Шовне зварювання неперервним випромінюванням характеризується наступними параметрами: розмірами, якістю з'єднання, продуктивністю (швидкістю обробки). Ці параметри залежать від потужності випромінювання, умов фокусування та середовища в якому у проводиться обробка.

Розміри шва визначаються головним чином потужністю випромінювання. При малих рівнях потужності – глибина проплавлення змінюється не суттєво, вона залежить більшою мірою від швидкості обробки (див.рис.24).

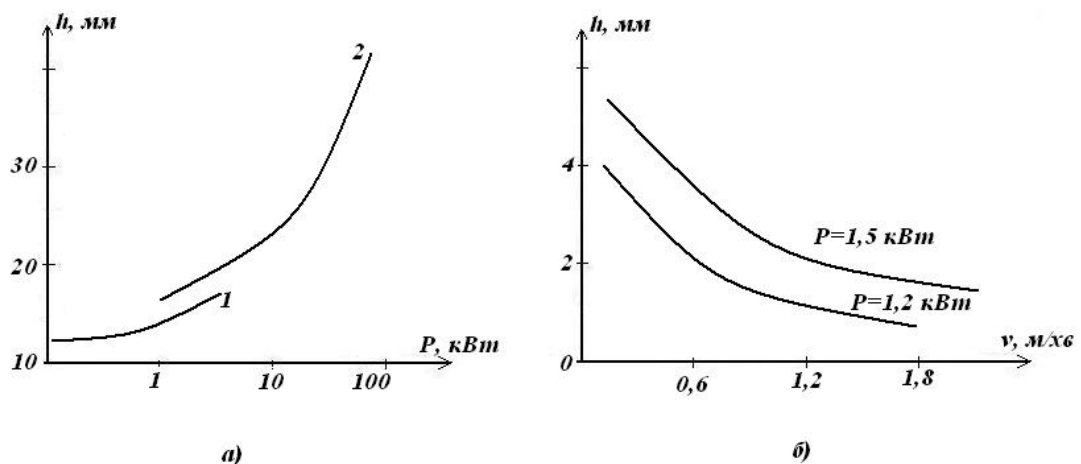


Рис.24.Залежність глибини проплавлення від: а) потужності випромінювання – де крива 1-теплопровідний режим розплавлення, 2-кінджальний режим розплавлення; б) швидкості переміщення випромінювання



Розміри зварювального шва значною мірою визначаються умовами фокусування. Максимальна глибина проплавлення досягається при розташуванні фокальної площини фокусуючої оптики на деякій відстані від оброблюваної поверхні вглиб матеріалу ( $-\Delta F$ ).

Для запобігання утворення на поверхні плазми, що складається з іонізованих молекул газів і випарених часток матеріалів, необхідно застосовувати газовий захист, тобто проводити обробку в атмосфері газу (гелій, аргон) або здувати плазму струменем інертного газу.

Оцінку ефективності проплавлення в різних газах можна провести співставленням коефіцієнта корисної дії (ККД) плавлення –  $\eta$ :

$$\eta = \frac{F_n v H \rho}{P},$$

де  $F_n$  – площа проплавлення,  $v$  – швидкість зварювання,  $\rho$  – густина розплаву,  $H$  – теплоємність розплаву,  $P$  – потужність лазерного випромінювання.

В деяких випадках, на величину проплавлення впливає кут нахилу променя до оброблюваної поверхні. Максимальна величина (глибина) проплавлення буде тоді – коли цей кут становитиме  $70 \div 75^\circ$ .

Якість шовного зварювання є дуже високою. Механічні властивості швів перевищують властивості з'єднаних матеріалів.

### §5.2.3. Вибір режимів

Вибір режимів здійснюється на основі експериментальних залежностей встановлених для зварювання різних конкретних матеріалів.

Загальне співвідношення для глибини проплавлення –  $h$  з потужністю випромінювання –  $P$  і швидкістю зварювання –  $v$ , можна описати як:

$$h = \beta P^{\frac{1}{2}} v^{-\alpha}.$$

$\alpha$ ,  $\beta$  – постійні, що залежать від характеристик лазерного випромінювання та властивостей оброблюваних матеріалів.

#### §5.2.4. Способи вдосконалення

Вдосконалення процесу шовного зварювання неперервним випромінюванням здійснюється, як оптимізацією умов обробки, так і застосуванням спеціальних засобів – направлених на підвищення ефективності і якості зварювання.

Спосіб 1. Нанесення поглинаючого покриття (при нанесенні поглинаючого покриття існує можливість зменшення густини потужності випромінювання).

Спосіб 2. Величина зазору не повинна перевищувати 5% від товщини деталі.

Спосіб 3. Використання додаткового джерела нагріву.

#### §5.2.5. Области застосування лазерного зварювання

Лазерне зварювання використовується в наступних процесах:

- зварювання великих ємностей, де важливу роль відіграє герметичність зварювального шву (зварювання трубопроводів, суднобудування, літакобудування ...);
- зварювання елементів електронних приладів (спаювання провідників до плат мікропроцесорів, виконання спаювання елементів генераторів частоти кварцових годинників...);
- інше...

#### §5.2.6. Переваги лазерного зварювання

- 1) На відміну, наприклад, від електронно-променевого зварювання – лазерне зварювання не потребує вакууму і може проводитись в будь-якому середовищі. Також, при його реалізації відсутнє шкідливе рентгенівське випромінювання.
- 2) При зварюванні утворюється дуже мала ЗТВ, тобто – практично не спостерігається зміна властивостей матеріалу (розміри шва є малими).

- 3) За рахунок локальності теплового впливу при лазерному зварюванні має місце мінімальна деформація деталей.
- 4) При лазерному зварюванні забезпечується дуже висока точність і продуктивність (швидкість процесу).
- 5) Можливе зварювання різноманітних матеріалів, а також магнітних сплавів.
- 6) При лазерному зварюванні можна досягнути більшого співвідношення глибини до ширини проплавленого матеріалу.
- 7) Лазерне зварювання відрізняється «гнучкістю» - процес легко переоснащується для обробки інших матеріалів, деталей.
- 8) Можливість обробки деталей будь-яких розмірів; можливість багатопозиційної (багатопрменевої) обробки, завдяки передачі випромінювання по світловодам. Простота переміщення променя вздовж деталі.
- 9) Можливе зварювання у важко доступних місцях, за рахунок безконтактності впливу, проведення обробки крізь прозорі матеріали.
- 10) Більш низька вартість обладнання і експлуатаційних витрат – порівняно з іншими видами зварювання.

Найбільш широко лазерне зварювання використовується для з'єднання елементів мікроелектроніки, обробки тонкостінних деталей середніх розмірів, з'єднання деталей з неметалевих матеріалів у приладобудуванні.

#### §5.2.7. Обладнання для лазерного зварювання

Для точкового зварювання, як правило, використовують установки на базі твердо тілних лазерів імпульсного випромінювання (неодимовий - ,YAG - лазер).

Для шовного зварювання використовується установка на базі твердо тілних лазерів імпульсного випромінювання та на базі газових лазерів (CO<sub>2</sub>) з неперервним випромінюванням.

## **Розділ 6. Лазерне маркування**

### §6.1. Переваги лазерного маркування

До переваг лазерного маркування належать:

- 1) мініатюрність знаку, що наноситься (ширина ліній менше 10 мкм);
- 2) відсутність механічного впливу на виріб за рахунок безконтактності методу обробки, і завдяки цьому – застосовність для маркування тонкостінних крихких деталей;
- 3) висока точність і якість нанесення знаків, що гарантує надійність і стабільність їх зчитування;
- 4) висока продуктивність процесу;
- 5) можливість повної автоматизації процесу.

Завдяки таким перевагам, можливість лазерного маркування проводять за наступними схемами:

- 1) за першою схемою – елементи знаку представляють собою послідовність зон лазерного впливу, розташованих на поверхні, у відповідності із законом переміщення деталі відносно випромінювання. В цьому випадку – на оброблюваному матеріалі утворюються смужки 10÷500 мкм і глибиною близько 10 мкм . Густина потужності приймається достатньою для плавлення матеріалу, а за необхідністю – для часткового випаровування матеріалу.

При обробці за першою схемою лазерне випромінювання може проводитись як неперервним випромінюванням, так і імпульсним випромінюванням. Для інтенсифікації процесу – крізь сопло, співвісно з випромінюванням подається кисень чи повітря.

- 2) друга схема передбачає сканування випромінювання вздовж оброблюваної поверхні. При цьому реалізується точково-матричний метод нанесення знаків. Зона елементарного впливу при цьому, представляє собою мікро-отвір (лунку) діаметром 70÷80 мкм.

Реалізація схеми точково-матричного маркування здійснюється випромінюванням з модульованою добротністю, при тривалості імпульсів  $0,1 \div 0,2$  мксек і високою піковою потужністю.

- 3) за третьою схемою маркування здійснюється за допомогою маски: маска встановлюється на шляху лазерного випромінювання, розширеного за допомогою телескопічної системи, для повного освітлення маски (див.рис.25)

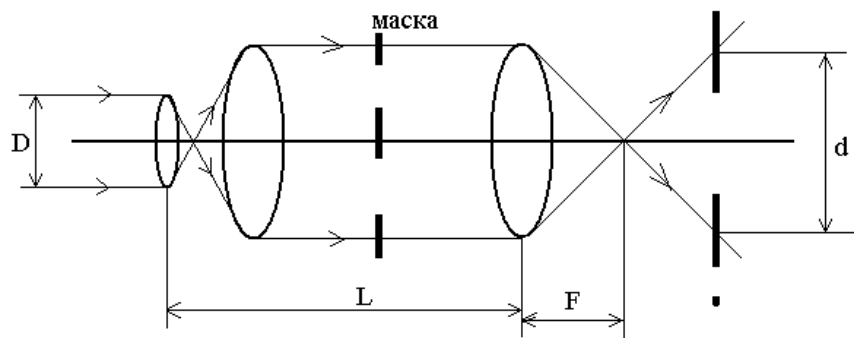


Рис.25. Лазерне маркування точково-матричним методом з використанням маски

$$d = \frac{DL}{L-F} .$$

Після маски фокусує система збирає випромінювання, що пройшло крізь маску і проектує зменшене обернене зображення маски на оброблювану поверхню. При реалізації цієї схеми, обробка проводиться імпульсним випромінюванням з енергією імпульсу, що є достатньою для отримання на матеріалі цього знаку.

Перевагою третьої схеми є те, що знак чи інформація з декількох знаків може бути нанесена за час дії одного чи серії імпульсів, це зумовлює високу продуктивність процесу маркування.

За певних умов, час нанесення знаку чи сукупності знаків може складати декілька мікросекунд.

4) четверта схема представляє собою маркування за допомогою трафарету. В цьому випадку, на оброблювану поверхню накладають трафарет з тугоплавкого матеріалу, контур якого, при опроміненні, обмежує лазерний вплив на матеріал. При достатній потужності випромінювання (імпульсного чи неперервного) дана схема дозволяє з високою продуктивністю здійснювати маркування, однак, недоліком цієї схеми є – швидке зношування трафарету і можливість пошкодження країв профілю знаку, при видаленні трафарету після маркування.

Приклади застосування лазерного маркування:

- електронна промисловість;
- нанесення знаків на скляні елементи (1-ша схема маркування);
- виготовлення топографічних кліше.

При виборі режимів маркування слід враховувати те, що не завжди рівні густини потужності випромінювання мають бути настільки високими, щоб забезпечити випаровування або плавлення матеріалу.

В ряді випадків, помітний знак на матеріалі може бути виконаний в результаті тільки локального нагрівання поверхні матеріалу (в деяких матеріалах мають місце термохімічні процеси, що дозволяють отримувати добре розрізняваний слід лазерного впливу).

#### §6.2. Обладнання для лазерного маркування

Маркування за першою схемою може здійснюватися на установках імпульсного і неперервного випромінювання, що випускаються для прошивки отворів і скрайбування матеріалів, за умови достатньої частоти імпульсів.

Для реалізації 3- 4-ї схем - основна вимога до обладнання – достатньо високий рівень потужності неперервного випромінювання або енергії імпульсу.

Обладнання для маркування за 2-ю схемою повинно бути повністю автоматизовано (див.рис26).

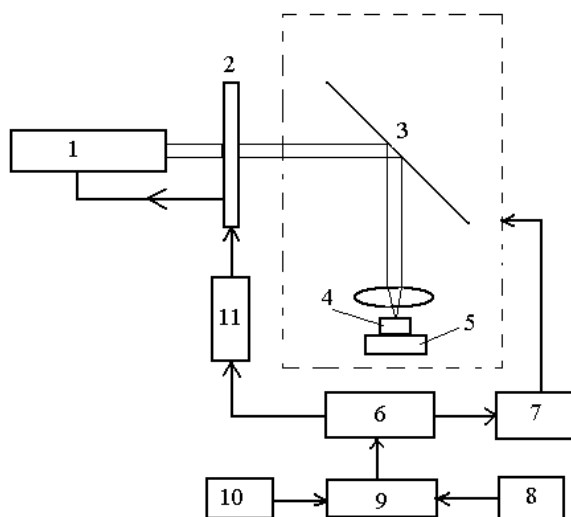


Рис.26. Автоматизована система маркування: 1-імпульсний високочастотний випромінювач, 2-акустооптичний модулятор добротності, 3-сканатор, 4-виріб, 5-робочий стіл, 7-підсилювач, 6-пристрій сполучення з ЕОМ-9, 8-пульт управління, 10- пристрій вводу інформації, 11-блок запуску модулятора добротності

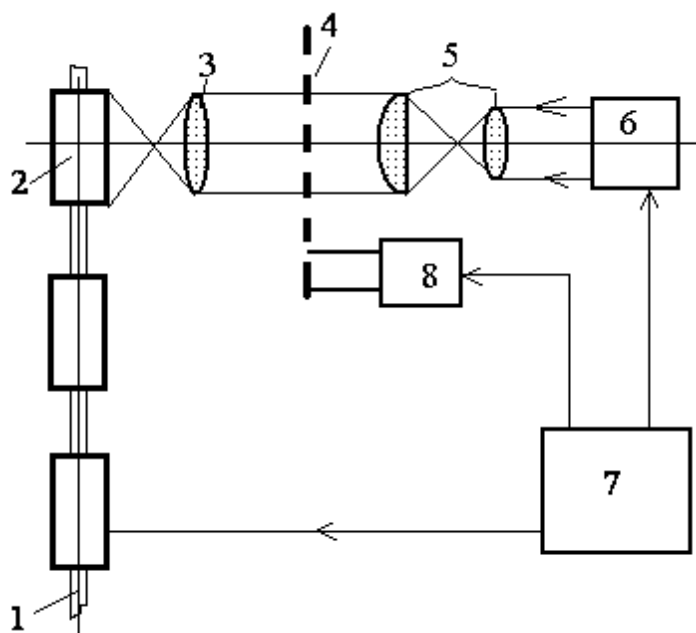


Рис.27.Схема маркування за допомогою маски

Для маркування за допомогою маски – потрібне випромінювання від досить потужного лазера (див.рис.27) де 6-лазер, 5-телескопічна система, 4- маска (у вигляді диску з тугоплавкого матеріалу(молібдену)). На диску вздовж периметру нанесені знаки, які при повороті крокового двигуна -8 можуть встановлюватись на вісі оптичної системи в потрібному порядку і проектуватись за допомогою фокусуючої оптики -3 на поверхню виробу-2.

Блок управління -7 узгоджує подачу лазерного імпульсу, поворот маски , переміщення виробку, а також – подачу нового виробу на робочу позицію за допомогою конвеєрної системи-1.