

## Лазерна обробка отворів

Лазерна обробка отворів виявилась одним з перших технологічних використань лазерного випромінювання. Виконується вона, як правило, за допомогою імпульсного лазерного випромінювання. Проте існує ряд операцій, для яких може використовуватися і неперервне лазерне випромінювання.

Утворення елементарного отвору, або лунки, під дією одиничного імпульсу лазерного випромінювання чи серії імпульсів, є базовим процесом не тільки для розробки технології прошивки отворів, але й для розробки операцій різання, отримання щілин, пазів, тощо. Тому на прикладі аналізу закономірностей імпульсної лазерної обробки отворів легше зрозуміти закономірності й інших процесів лазерної обробки.

### 9.1 Закономірності процесу обробки отворів

**Розмірні характеристики.** На сучасному обладнанні головними параметрами управління процесами лазерної обробки отворів є: енергія випромінювання в імпульсі  $E$ , тривалість імпульсу  $\tau$ , фокусна відстань фокусуєчої системи, зміщення поверхні зразка відносно фокальної площини фокусуєчої системи  $\Delta F$  та кількість імпульсів  $n$ . Наприклад, зі зростанням енергії в імпульсі зростають як діаметр, так і глибина лунки, причому, вони залежать від енергії нелінійно.

Зростання фокусної відстані при заданих  $E$  і  $\tau$  призводить до зменшення густини потужності лазерного випромінювання. Це викликає зменшення глибини вхідного діаметру отвору.

Зміна тривалості імпульсу  $\tau$  (при постійних значеннях енергії) також призводить до зміни густини потужності. При дії на матеріал імпульсів різної тривалості характер руйнування поверхні буде неоднаковим. Так, при коротких імпульсах в результаті більш високої густини потужності, що підводиться до матеріалу, зростає температурний градієнт, що, в свою чергу, призводить до зростання частки випареного матеріалу в продуктах лазерної ерозії. У випадку дії довгих імпульсів лазерного випромінювання картина руйнування відрізняється від попередньої. В продуктах викидання переважає розплавлений метал, який у вигляді значного кратеру залишається біля краю отвору. Тому до області звичайної розмірної обробки слід віднести діапазон тривалостей імпульсів від  $0,1 \cdot 10^{-3}$  до  $2 \cdot 10^{-3}$  с.

Значний вплив на форму і розміри отвору має кількість імпульсів, що подаються до зони лазерної дії. При зростанні  $n$  в зону лазерної дії послідовно подається значна кількість енергії. Проте при цьому не спостерігається такого значного збільшення діаметру та глибини лунки, як у випадку простого підвищення енергії в одиничному імпульсі.

Зі зростанням кількості імпульсів глибина отвору помітно зростає, але до деякої межі, що визначається параметрами оптичної системи, енергією імпульсу, його тривалістю, властивостями матеріалу, тощо.

На рис. 9.1 показана зміна глибини отвору зі зростанням кількості імпульсів, які послідовно подаються до зони лазерної дії технічного заліза А1 та вуглецевої сталі У8.

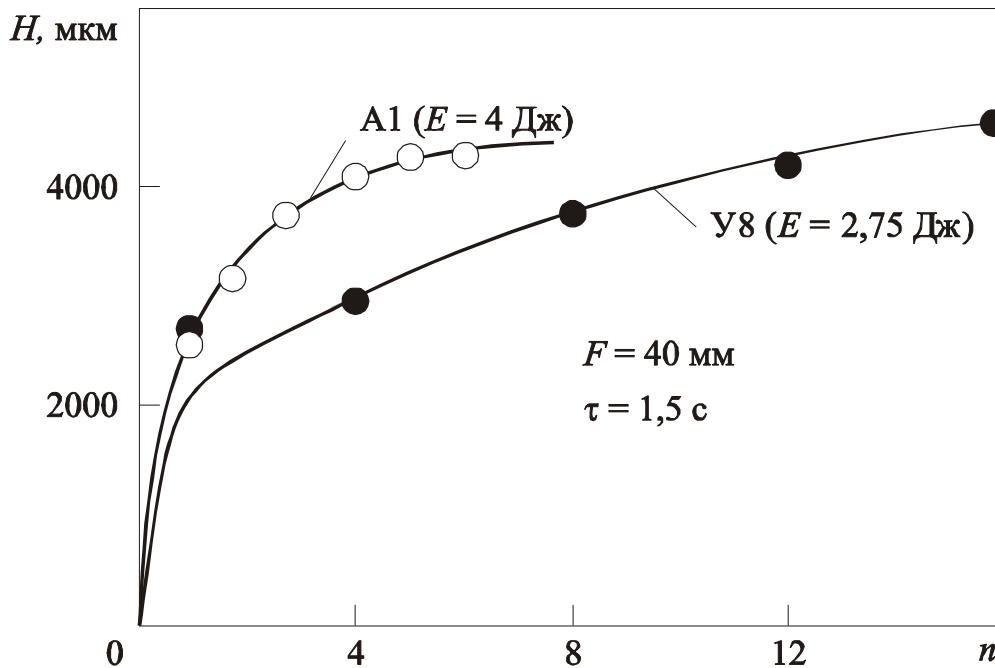


Рис. 9.1

Із залежностей видно, що інтенсивне зростання глибини отвору має місце при підвищенні кількості імпульсів до 2 – 4. З подальшим зростанням  $n$  підвищення глибини  $H$  сповільнюється. Одне з можливих пояснень цього ефекту полягає в тому, що отвір, утворений від дією лазерного імпульсу, діафрагмує кожен наступний порцію випромінювання, значно знижуючи інтенсивність дії наступного імпульсу. Зростання кількості імпульсів не викликає суттєвої зміни діаметру отвору.

У випадку дії на матеріал ряду послідовних імпульсів необхідно звернути увагу на залежність форми отриманого отвору від енергії. Так, при отриманні отвору одиночним імпульсом високої енергії (до 40 – 60 Дж) утворюється значна кількість рідкої фази в порожнині отвору і вихід продуктів викидання із зони лазерної дії обмежується силами поверхневого натягу. Внаслідок цього утворюється отвір каплеподібної форми. Таким же чином обробка за допомогою серії послідовних імпульсів високої енергії в результаті значного зростання густини потужності в зоні лазерної дії призведе до утворення отвору, форма якого являє собою ряд послідовних каплеподібних порожнин. Тому для покращення форми отвору під час поліімпульсної обробки необхідно знижувати енергію випромінювання в окремому імпульсі.

Ще одним важливим параметром процесу, що впливає на розміри і форму отворів при лазерній обробці, є величина зміщення поверхні зразка відносно

фокальної площини фокусууючої системи  $\Delta F$ . Оптимальні розмірні параметри отвору (найменший діаметр, найбільша глибина, постійна конусність) мають місце при розташуванні зразка у деякій зоні між фокальною площиною фокусууючої оптики та самою фокусууючою оптикою, тобто при певному від'ємному зміщенні  $\Delta F$ . При позитивному зміщенні ( $+\Delta F$ ) зменшується глибина отвору, підвищується конусність, зростає діаметр отвору на вході променя. При значному зміщенні, як від'ємному, так і позитивному, густина потужності знижується настільки в результаті дефокусування випромінювання, що відбувається лише проплавлення матеріалу без утворення отвору.

Ступінь зміщення поверхні, що оброблюється, відносно фокальної площини фокусууючої оптики впливає також на формування отвору. З наведеної на рис. 9.2 діаграми видно, що форма отворів при варіюванні  $\Delta F$  змінюється від конічної до циліндричної і каплеподібної. З отриманих експериментальних даних випливає, що при необхідності отримання наскрізних отворів з малою конусністю фокус лазерного променя повинен розташовуватися на деякій відстані від поверхні обробки в глибину матеріалу (наприклад, для  $F = 13,9$  мм,  $-\Delta F = 0,1 \div 0,2$  мм).

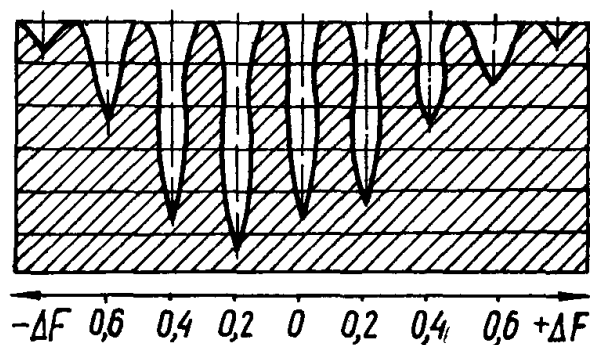


Рис. 9.2

Для отримання наскрізного отвору з незначними конусами на вході та виході доцільно розташовувати поверхню, що оброблюється, у фокусі променя або в зоні позитивного зміщення (наприклад, для  $F = 13,9$  мм,  $\Delta F = 0$  або  $+\Delta F = 0,1$  мм).

При значному зміщенні, як позитивному, так і від'ємному, є можливість отримання наскрізних отворів з великим вхідним конусом. Таким чином, досить якісні отвори отримуються в діапазоні зміщень  $-0,2 \leq \Delta F \leq +0,1$  мм. Проте оптимальним значенням зміщення треба вважати,  $-\Delta F = 0,1 \div 0,2$  мм.

Величина зони оптимальних зміщень визначається параметрами фокусууючої оптики і величиною розбіжності лазерного променя. При постійній розбіжності променя для оптики зі значною фокусною відстанню зона зміщення є більшою, і навпаки.

Отримана залежність для визначення оптимального положення фокальної

Площини фокусувальної оптики може бути також використаною при виборі режимів контурно-променевої лазерної обробки, зокрема, для отримання різів і пазів з малою клиноподібністю.

**Вибір оптимальних режимів обробки отворів.** На розмірні параметри отворів при лазерній обробці впливає значне число факторів. Різними авторами на основі вивчення взаємодії лазерного випромінювання з речовиною були запропоновані теоретичні залежності для визначення глибини  $H$  і діаметра  $D$  для матеріалу виробів, що оброблюються (таблиця 9.1).

Таблиця 9.1

Залежність	Автор
$H = n' \frac{\ln \frac{(1 - \bar{\alpha}) \int_0^{\tau} q dt \cdot k}{\rho [L_g + L_n + G(T_g - T_n)]}}{k}$	Тархов Г.І., 1965 р.
$H = \text{const} \left( \frac{\rho}{E} \right)^k t^{1+3b} L_g^{\frac{1}{2}(sk+1)}$ $D = \text{const} \left( \frac{\rho}{E} \right)^b t^{1+3b} L_g^{\frac{1}{2}(sb+1)}$	Уляков П.П., 1967 р.
$H = \frac{1}{CT + \rho L_g} \int_0^{\tau} q(t) dt$ $D = \sqrt{\frac{12}{\pi \rho H [CT_n - C'(T_g - T_n) + L_g + L_n]}}$	Коваленко В.С., 1968 р.
$H = \sqrt[3]{\left( \frac{r}{\text{tg} \gamma} \right)^3 + \frac{3E}{\pi g^2 \gamma L_g} - \frac{r_0}{\text{tg} \gamma}}$ $D = 2 \sqrt[3]{r_0^3 + \frac{3E \text{tg} \gamma}{\pi L_n}}$	Вейко В.П., Лібенсон М.М., 1969 р.
$D = 2 \sqrt{\frac{d_0}{2} \ln \left( \frac{2P_0}{\pi q d_0^2} \right)}$	Satoshi N., Yasunao S., Kiichi T., 1971 р.
$H \approx \frac{4q}{2\pi K (T_n - T_0)}$	Weaver L., 1971 р.

Примітка:

$q$  - густина випромінювання;  $k$  - коефіцієнт поглинання матеріалу;  $\bar{\alpha}$  - коефіцієнт відбиття матеріалу;  $\rho$  - густина матеріалу;  $C$  та  $C'$  - теплоємність матеріалу у твердому та рідкому станах;  $T_g$  - температура випаровування;  $T_n$  - температура плавлення;  $T$  - температура в зоні лазерної дії;

$L_g$  - прихована теплота випаровування;  $L_n$  - прихована теплота плавлення;  $r_0 = d_0/2$  - радіус плями фокусування;  $K$  - теплопровідність;  $T_0$  - температура навколишнього середовища;  $2\gamma$  - кут світлового конусу;  $n'$  - кількість "пічків" випромінювання;  $P_0$  - потужність випромінювання;  $t$  - час від початку руйнування;  $k, b$  - показники ступеня.

Аналіз наведених формул показав, що виведенні цих залежностей була зроблена спроба врахування як властивостей лазерного випромінювання, так і теплофізичних характеристик матеріалу, що оброблюється. Проте справедливість цих формул оговорюється таким значним числом обмежень, що використовувати їх на практиці недоцільно і навіть неможливо. Крім того, у зазначених формулах не враховані й такі характеристики, як кількість імпульсів, величина зміщення деталі, що оброблюється, відносно фокальної площини фокусуючої оптики, тощо. Ті ж із режимів обробки, вплив яких відображено, входять до складу формул майже побічно, а не прямо, що утруднює їх практичне використання. Необхідно відмітити, що не завжди ще відомі теплофізичні параметри матеріалів, які піддаються лазерній обробці.

Тому на даному етапі розвитку лазерної технології наведені теоретичні залежності можна використовувати лише для орієнтовної оцінки розмірних характеристик при лазерній обробці матеріалів з відомими властивостями.

У зв'язку з цим на сьогодні гостро постає проблема розробки інженерних методів розрахунку та вибору оптимальних режимів обробки отворів із заданими характеристиками.

При цьому на першому етапі реалізації цих методів можна базуватися на емпіричних чи напівемпіричних залежностях, отриманих при експериментальній обробці конкретного матеріалу на конкретному обладнанні. Маючи такі залежності, можна побудувати ряд номограм для вибору оптимальних режимів лазерної обробки отворі у різних матеріалах. Емпіричні залежності звичайно відображають залежність розмірних характеристик від зміни одного чи декількох параметрів при фіксованому значенні останніх.

Наприклад, для матеріалів типу кременистої бронзи БрКМц3-1 формула для визначення вхідного діаметру отвору має вигляд

$$D_{ex} = 2,44 \frac{\lambda}{D_n} C E^{0,4} F, \quad (9.1)$$

де  $\lambda$  - довжина хвилі випромінювання;

$C$  - коефіцієнт оброблюваності.

При виведенні формули припускалося, що обробка проводиться одиночними імпульсами, тобто  $n = 1$ , а коефіцієнт оброблюваності  $C$  враховує характеристики матеріалу, стан поверхневого шару та інші фактори.

**Якість поверхні отворів.** На цей час отвори, які отримуються у виробках за допомогою лазерного випромінювання, використовуються, в основному, не для спряження з іншими деталями, а для пропускання різних променів

(наприклад, світлових, електронних, рентгенівських), різних рідких чи газоподібних середовищ (повітря, вода, пальне, тощо). Тому жорсткі вимоги ставляться головною мірою до точності розмірних характеристик отворів, а не до якості обробленої поверхні. Проте для деяких технічних використань має значення і мікро геометрія поверхні, а також вплив різних факторів на шорсткість поверхні.

Наприклад, при обробці отворів у сталях, що вміщують різну кількість вуглецю, оцінка мікро геометрії поверхні дозволила виявити наступну цікаву закономірність. Зі зростанням вмісту вуглецю в сталі спостерігається тенденція до зниження шорсткості оброблюваної поверхні. Цей факт можна пояснити таким чином. При лазерній обробці мікрорельєф поверхні отвору утворюється розплавленим металом, в'язкість якого відіграє важливу роль у формуванні поверхневого шару отвору. Встановлено, що в'язкість розплавленої сталі залежить від вмісту в ній вуглецю. Для сталей, що вміщують 0,2 – 0,6 % С, в'язкість розплаву зменшується зі зростанням вуглецю. У зв'язку з цим при лазерній обробці отворів у сталях з високим вмістом вуглецю внаслідок низької в'язкості розплаву складаються умови для видалення його з порожнини отвору. Тому в експериментах і виявляється зростання висоти мікро нерівностей зі зменшенням вмісту вуглецю в сталях.

При визначенні впливу режимів обробки на шорсткість поверхні найбільш важливими є три фактори: енергія випромінювання, тривалість імпульсу та кількість імпульсів.

Закономірність зміни висоти мікронерівностей поверхні в залежності від енергії випромінювання записується у вигляді:

$$R_z = c_E E^x, \quad (9.2)$$

де  $c_E$  - коефіцієнт, що характеризує властивості матеріалу та режими обробки;

$x$  - показник ступеня;

$E$  - енергія випромінювання, Дж.

Висота мікронерівностей поверхні зменшується зі зростанням тривалості імпульсу. Залежність висоти мікронерівностей поверхні від тривалості імпульсу (для параметрів:  $\tau = 1,5 \div 8$  мс;  $E = 1$  Дж;  $F = 8,2$  мм) описується такою формулою

$$R_z = c_\tau \tau^{-y}, \quad (9.3)$$

де  $c_\tau$  - коефіцієнт, що характеризує властивості матеріалу та режими обробки;

$y$  - показник ступеня;

$\tau$  - тривалість імпульсу.

Загальна залежність при визначенні висоти мікронерівностей поверхні після лазерної обробки записується у вигляді:

$$R_z = cE^x \tau^{-y} n^z, \quad (9.4)$$

де  $c$  - коефіцієнт, що визначається експериментально;

$n$  - кількість імпульсів.

Таким чином, при зростанні густини випромінювання чи зменшенні тривалості імпульсу висота мікронерівностей зростає.