

Лазерне різання матеріалів

За допомогою лазерного випромінювання при високих температурах у зоні лазерного впливу можна здійснити локальну руйнацію матеріалу і на цій основі створити ефективні технологічні процеси лазерного різання, крою, отримання щілин, швів, пазів, скрайбування, тощо.

Ці процеси можуть бути виконаними як за допомогою імпульсного, так і за допомогою неперервного лазерного випромінювання. Звичайно імпульсне лазерне випромінювання використовують для прецизійного різання, отримання пазів та щілин малих розмірів з високою точністю. Проте продуктивність у цьому випадку різко знижується.

7.1 Різання за допомогою імпульсного лазерного випромінювання

Ефективність процесу різання за допомогою імпульсного лазерного випромінювання визначається такими параметрами, як швидкість різання, розміри різку, шорсткість поверхні різку, точність обробки. Якщо знати закономірності зміни цих параметрів, то можна визначити оптимальні режими різання імпульсним лазерним випромінюванням.

Швидкість різання v можна виразити таким чином:

$$v = \frac{L}{t} = \frac{nDk_n}{t}, \quad (7.1)$$

де, t - час обробки, L - довжина різку, n - кількість імпульсів, D - діаметр елементарного отвору (лунки), k_n - коефіцієнт перекриття, $k_n = \frac{s}{D}$, s - крок обробки.

Якщо лазер працює в автоматичному імпульсному режимі з частотою імпульсів f (рис. 7.1), то у цьому випадку

$$v = Dk_n f = sf. \quad (7.2)$$

Імпульсне джерело тепла вважається нерухомим, якщо $\tau < 0,1D_0/2v$, де τ - тривалість імпульсу, а D_0 - діаметр плями фокусування. Тому, незважаючи на безперервне переміщення деталі (або променя) зі швидкістю v , процес утворення наступної лунки не буде залежати від швидкості обробки і буде відбуватися таким же чином, як і у випадку обробки нерухомим променем.

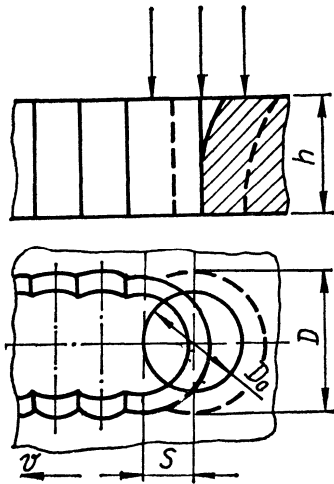


Рис. 7.1

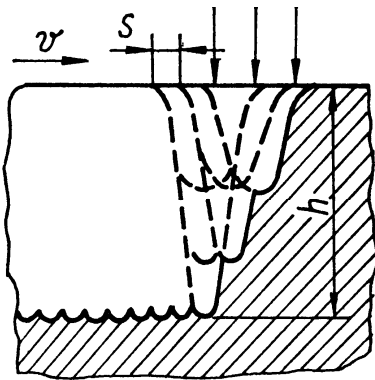


Рис. 7.2

Наведена залежність для швидкості обробки є справедливою при незначних товщинах листа, що розрізається, тобто у тому випадку, коли, коли кожний імпульс утворює наскрізний отвір.

Зростання товщини матеріалу призводить до того, що для утворення кожного елементарного отвору необхідно затратити вже декілька імпульсів. Тоді після переміщення променя на величину крока s передній край лазерної плями, попадаючи на верхню кромку матеріалу, утворює черговий елементарний отвір (рис. 4.2). А остання частина випромінювання в цей час поглиблює попереднє елементарне заглиблення. Повна глибина різку при цьому буде залежати від кількості імпульсів, що підводяться до кожного елементарного отвору. Кількість же імпульсів буде залежати від кроку обробки, а значить, і від швидкості обробки:

$$n = \left[\frac{D_0 + D}{2s} \right] + 1 \approx \frac{1}{k_n}. \quad (7.3)$$

Якщо позначити глибину різку через h , а його ширину через b , то при обробці імпульсним лазерним випромінюванням справедливими будуть формули:

$$h = \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{2 \operatorname{tg} \gamma} \right)^3 + \frac{3E}{\pi k_n \operatorname{tg}^2 \gamma L_g}} - \frac{D_0}{2 \operatorname{tg} \gamma}; \quad (7.4)$$

$$b = 2 \sqrt[3]{\left(\frac{D_0}{2} \right)^3 + \frac{3E}{\pi L_g} \operatorname{tg} \gamma}, \quad (7.5)$$

де E - енергія випромінювання в імпульсі;

L_g - теплота випаровування матеріалу;

γ - половинний кут растру світлового конусу.

Теоретичні розрахунки (7.4) та (7.5) мають розходження з експериментальними даними, а тому можуть бути використаними лише для оціночних результатів.

Глибина h різку зі зростанням енергії і зниженням швидкості не може зростати необмежено, оскільки по мірі проникнення випромінювання вглиб різку його густина енергії зменшується. І при досягненні деякого порогового значення W_E^n зростання різку за глибиною припиняється. Тому максимальна глибина різку, яка може бути досягнутою, визначається із співвідношення

$$h_{\max} = \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma} \left(\sqrt{\frac{E}{\pi W_E^n}} - \frac{D_0}{2} \right). \quad (7.6)$$

Максимальна ж кількість імпульсів, що підводиться до кожного елементарного отвору, визначається при цьому з виразу

$$n_{\max} = \frac{1,7}{\sqrt[3]{\operatorname{tg} \gamma}} \cdot \frac{\sqrt[6]{L_g^2 E}}{\sqrt{W_E^n}}. \quad (7.7)$$

Тоді мінімальна швидкість різання, при якій на заданій частоті f імпульсів досягається максимальна глибина різку, буде

$$v_{\min} = 1,16 f^3 \sqrt[3]{\operatorname{tg}^2 \gamma} \cdot \frac{\sqrt{W_E^n} \sqrt[6]{E}}{\sqrt[3]{L_g^2}}. \quad (7.8)$$

Максимально можлива швидкість обробки, при якій ще буде відбуватися формування різку, знаходиться із умови, що $k_n = 1$, тобто $s = D$:

$$v_{\max} = 2f^3 \sqrt{\left(\frac{D_0}{2} \right)^3 + \frac{3E}{\pi L_g} \operatorname{tg} \gamma}. \quad (7.9)$$

В таблиці 7.1. наведені максимальні розрахункові швидкості різання та глибина різку в залежності від енергії імпульсу для сталі $W_E^n = 300 \text{ Дж/см}^3$ при $f = 10 \text{ Гц}$.

Таблиця 7.1

$E, \text{ Дж}$	Розрахункові значення			Експериментальні дані		
	$v_{\min} \cdot 10^{-2},$ см/с	$v_{\max} \cdot 10^{-1},$ см/с	$h_{\max}, \text{ мм}$	$v_{\min} \cdot 10^{-2},$ см/с	$v_{\max} \cdot 10^{-1},$ см/с	$h_{\max}, \text{ мм}$
2	6,1	4,2	1,03	2,0	2,0	1,49
5	7,1	5,6	2,82	2,5	2,5	2,12
10	7,9	7,0	4,23	3,5	3,0	3,07

Порівняння з експериментальними даними дає задовільне співпадання за порядком величини. Розбіжності викликані, очевидно, труднощами у визначенні істинного значення D .

Для того, щоб збільшити глибину різку необхідно дещо заглибити промінь всередину матеріалу ($-\Delta F$), хоча найменша ширина різку отримується при $\Delta F = 0$. Тобто, керуючи параметром ΔF , можна впливати на форму різку у поперечному перерізі. Крім того, на форму різку впливає також і енергія випромінювання. При постійній товщині заготовки зі зростанням енергії випромінювання в імпульсі знижується клиноподібність різку.

При необхідності отримання глибоких пазів чи різів обробку необхідно виконувати за допомогою довгофокусної оптики на низьких швидкостях відносно переміщення променя і деталі при високих значеннях густини потужності випромінювання (тобто імпульсами малої тривалості та високої енергії).

Ширина різку на верхній та нижній кромках матеріалу зростає з підвищенням енергії випромінювання, фокусної відстані лінзи та зниженням тривалості імпульсу і не залежить від швидкості різання на верхній кромці. У той же час зниження швидкості призводить до значного зростання ширини різку на нижній кромці матеріалу і, значить, до зниження клиноподібності різку. Таким чином, **вузькі щілини, різки отримують при різанні за допомогою короткофокусної оптики випромінюванням низької густини потужності.**

Шорсткість поверхні різку при імпульсній обробці з чисто геометричних міркувань визначається величинами D та s . На шорсткість поверхні найбільший вплив має швидкість обробки. Якість поверхні різку можна досить суттєво покращити таким чином:

- а) **“виходженням” обробленої поверхні**, тобто повторним чи багаторазовим проходженням лазерного променя по раніше отриманому різі з тим же або іншим кроком s ;
- б) **обробкою у рідкому середовищі**. У цьому випадку рідина виконує наступні функції:
 - 1) захоплюючи частки розплаву і пари металу, які викидаються із зони лазерної дії, рідке середовище сприяє процесові диспергування продуктів ерозії, утворенню гранул кулеподібної форми;
 - 2) захоплення часток металу рідким середовищем перешкоджає осадженню продуктів лазерної ерозії на поверхні різку, що призводить до зниження шорсткості обробленої поверхні;
 - 3) рідке середовище евакуює продукти ерозії із зони обробки, сприяючи більш стабільному проходженню процесу;
 - 4) рідина відводить тепло, забезпечуючи при цьому більш ефективніше, ніж у газі охолодження малих деталей від небажаного перегріву.

Як рідина може використовуватися вода чи чотирьоххлористий вуглець.

До усього зазначеного вище можна додати, що при використанні високочастотного імпульсного лазерного випромінювання швидкість обробки можна підвищити інтенсифікуючи процес ерозії за рахунок екзотермічної

реакції в зоні лазерного впливу. Для цього одночасно з випромінюванням через сопло до елементарного отвору подається кисень або повітря.

7.2 Різання за допомогою імпульсного лазерного випромінювання

Використання неперервного лазерного випромінювання значно розширює технологічні можливості процесів різання та крою матеріалів. Для цих цілей використовуються неперервні лазери будь-якого типу, але найбільшого застосування набуло різання за допомогою інфрачервоного випромінювання CO₂-лазерів. Для інтенсифікації процесу різання разом з променем в зону лазерної дії подається й струмінь газу, у більшості випадків інертного (аргон, гелій, азот) для усунення процесів окислення. Таке різання називається *газолазерним різанням*.

Розглянемо окремо різання металевих та неметалевих матеріалів, оскільки інфрачервоне випромінювання погано поглинається металами і добре неметалами.

7.2.1 Металеві матеріали

Розглянемо закономірності зміни характеристик процесу різання від потужності випромінювання, виду газу, що подається, типу матеріалу, умов фокусування, тощо.

Ширина різку. Можливості використання лазерного різання найбільшою мірою характеризуються цим параметром, оскільки основним недоліком усіх традиційних видів різання є дуже велика ширина різку, а значить, і висока кількість відходів.

Ширину різку можна визначити зх положень теорії квазістаціонарного руйнування матеріалу згідно виразу

$$b = 2 \left[r_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{2r} \right)^2} + x_s \right], \quad (7.10)$$

де r_0 - радіус плями фокусування лазерного променя;

x_0 - відстань, на яку переміститься лазерне джерело по верхній кромці матеріалу за час t_0 встановлення квазістаціонарного режиму руйнування;

$$x_0 = \frac{2a}{v} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{K}{a} v \left(\frac{T_n - T_0}{q} \right)} \right); \quad (7.11)$$

x_s - розміри зони рідкого металу, що утворився за час t_n , який необхідний для досягнення температури плавлення T_n :

$$x_s = \sqrt{a(t_0 - t_n)}; \quad t_n = \frac{2a}{v^2} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{K}{a} v \left(\frac{T_n - T_0}{q} \right)} \right), \quad (7.12)$$

де T_0 - вихідна температура металу;

T - температура в зоні лазерного впливу;

K - коефіцієнт теплопровідності;

a - коефіцієнт температуропроводності;

v - швидкість переміщення лазерного випромінювання.

При високих швидкостях обробки тепло відводом від зони лазерного впливу можна знехтувати і тоді формула для розрахунку величини b спрощується:

$$b = 2r_0 \sqrt{1 - \left(\frac{x_0}{2r_0} \right)^2}. \quad (7.13)$$

Розрахункові значення ширини різку задовільно співпадають з експериментальними.

Зона термічного впливу. Розглянемо конкретні приклади. При різанні високовуглецевої сталі розміри зони термічного впливу зменшуються зі зростанням швидкості обробки, причому ці розміри практично не залежать від товщини сталі. Проте для тонких зразків розміри зони є меншими, ніж для зразків більшої товщини. Розміри зони залежать також від тиску кисню, що подається. Зі зростанням тиску розміри зони зменшуються при будь-якій швидкості обробки.

Потужність випромінювання також впливає на розміри зони термічного впливу: зі зростанням потужності зростають і розміри зони.

У нержавіючих сталях при низьких тисках кисню розміри зони термічного впливу змінюються в широких межах. Але зі зростанням тиску до 0,15 – 0,25 МПа та при високих швидкостях різання ніяких змін у характері закономірностей не спостерігається. Звідси випливає, що для якісного різання при високій швидкості достатньо підтримувати тиск на рівні 0,15 МПа.

При лазерному різанні титану розмірами зони термічного впливу керують змінюючи тиск аргону. Якщо швидкість різання не є настільки низькою, щоб викликати перегрів прилягаючого до різку металу, а кількість аргону є достатньою, щоб забезпечити область різання від значного горіння металу, то розміри зони термічного впливу є дуже малими або ця зона відсутня зовсім.

При різанні алюмінію зона термічного впливу взагалі не виявляється.

Шорсткість поверхні. Топографія поверхні різку, специфіка розташування мікро нерівностей визначаються розмірами зони розплавленого

металу x_s , оскільки поверхня різку розплавленим матеріалом, який застиг після зміщення лазерного променя у напрямку обробки. Крім того, x_s залежить від теплофізичних властивостей матеріалу, густини потужності випромінювання та швидкості переміщення променя.

Згідно теоретичних розрахунків висота мікронерівностей $R_z = 0,134 x_s$. Експериментальні результати досить добре співпадають з теоретичними, проте на шорсткість реальної поверхні впливають ряд факторів і умов обробки: товщина заготовки, тиск газу, що піддувається, вид газу, тип матеріалу, тощо.

Як приклад розглянемо високовуглецеву сталь.

При різанні такої сталі малої товщини ($h = 1$ мм) спостерігається досить висока якість поверхні різку. При цьому величина R_z є стабільною по всій поверхні різку. На шорсткість поверхні впливає швидкість різання, причому існує оптимальне значення швидкості, при якому R_z є мінімальною.

Зростання товщини сталі призводить до того, що шорсткість стає неоднаковою по поверхні різку. У тій області різку, яка є близькою до місця входження лазерного випромінювання в речовину, R_z є мінімальною. У середній частині поверхні різку значення R_z є вищими і продовжують зростати далі у напрямку виходу променя з матеріалу.

Зміна відносної швидкості призводить до зміни шорсткості поверхні на всіх трьох ділянках. Існує деяка тенденція до зменшення шорсткості поверхні при деяких проміжних швидкостях між найвищою та найнижчою. Так, для сталі товщиною 2,2 мм ця швидкість дорівнює 3 м/хв, а для сталі з $h = 3,3$ мм – 2 м/хв (при потужності променя $P = 0,9$ кВт і тискові газу $p = 0,15$ МПа). Але для більш товстих зразків шорсткість поверхні на виході променя є набагато вищою, ніж для тонких зразків. На вході ж променя R_z є приблизно однаковою для зразків різної товщини (10 мкм і менше), якщо зразки оброблювалися при оптимальних для даних товщин швидкостях.

Інші характеристики. При різанні високовуглецевої сталі значної товщини ($h = 5,2$ мм) при малій відносній швидкості (0,5 м/хв) має місце інтенсивне горіння металу після того, як матеріал нагрівається до температури, яка є достатньою для підтримання такого процесу. Тому на початку різку його ширина є, як правило, незначною. Але після того, як зразок стане перегрітим і активізується процес горіння, його ширина стає в 4 – 6 разів більшою і різ набуває неправильної форми. Борозни рельєфу, які є характерними для обробленої поверхні, при малих швидкостях різання розташовуються нормально відносно кромки різку. Проте зі зростанням швидкості виникає нахил цих борозен, а кут нахилу поступово підвищується, причому борозни відхиляються у протилежний рухові лазерного променя бік. Ступінь відхилення є вищим у нижній частині різку. Це пояснюється зниженням питомої енергії лазерного променя, а також недостатньою кількістю кисню у цій області при високій швидкості різання, в результаті чого розплавлений метал ефективно не видаляється із зони обробки.

Точність різання. Як при різанні неперервним лазерним випромінюванням, так і при різанні імпульсним лазерним випромінюванням, поле розсіяння дійсних значень ширини різку складає 8 – 10 % від номіналу.

Незважаючи на те, що ширина різку залежить від швидкості обробки, навіть при різних швидкостях виявляється стабільність характеристик різання, хоча існує деяка тенденція до зростання точності при малих швидкостях. Точність різання залежить, звичайно, від точності переміщення заготовки та від системи управління лазерним випромінюванням. Крім того, вона залежить також від товщини матеріалу (для незначних товщин точність різання є значно вищою). Наприклад, при різанні листа товщиною 6 мм похибка ширини різку не перевищує 0,1 мм.

Вибір оптимальних режимів. Розробка аналітичних залежностей для оптимальних режимів різання є дуже складною задачею внаслідок необхідності урахування всієї кількості процесів, які відбуваються в зоні лазерної дії. Тому оптимальні режими доцільно визначати з математичних залежностей, отриманих на основі експериментальних даних. Найбільш важливими факторами, які при цьому необхідно враховувати, є потужність лазерного випромінювання, швидкість різання і тиск газу.

7.2.2 Неметалеві матеріали

Ефективність обробки неметалевих матеріалів є високою, оскільки на відміну від металів вони дуже добре поглинають інфрачервоне випромінювання. Цією властивістю і обумовлюється необхідність використання CO₂-лазерів ($\lambda = 10,6$ мкм) для різання склотканин, синтетичних матеріалів, кераміки, дерева пластмаси, тощо. При обробці таких матеріалів в зоні лазерної дії спостерігається, як правило, локальний процес горіння, хоча деяких випадках (наприклад, при обробці кераміки і склотканини) основним механізмом руйнування є плавлення матеріалу. Щоб розплавити неметалічні матеріали необхідна питома енергія всього біля 1 – 2 кДж/см³, у той час як для плавлення металів вона зростає у декілька разів. У випадку ж випаровування матеріалу ця різниця змінюється на порядок.

Крім того, неметалеві матеріали мають набагато меншу теплопровідність, ніж металеві. Тому при підведенні лазерного випромінювання до поверхні неметалевого матеріалу має місце дуже висока локалізація енергії, що й визначає можливість досягнення високих швидкостей різання різних неметалевих матеріалів.

Енергетичні умови обробки у цьому випадку оцінюються за допомогою питомої енергії різання S_0 . Цей параметр є енергетичною характеристикою матеріалу і не залежить від умов різання

$$S_0 = CT_0, \quad (7.14)$$

де C – питома теплоємність; T_0 - температура руйнування матеріалу.

У таблиці 7.2 наведені значення S_0 для деяких матеріалів.

Таблиця 7.2

Матеріал	S_0 , кДж/год
Текстоліт	50
Склотекстоліт	47
Кераміка	30
Азбоцемент	28
Азбест листовий	20
Фанера	5,4
Дуб	5,4
Сосна	0,9
Вініпласт	1,8
Резина	2,1
Плексиглас	2
Картон	0,8

Ширина різь. Визначається, в основному, швидкістю обробки – зі зростанням швидкості зменшується ширина різь (при постійній потужності лазерного випромінювання). Крім того, ширина різь залежить від товщини матеріалу і від виду матеріалу. Так, при різанні ватману ($h = 0,5$ мм, $v = 1,2$ м/хв, $P = 4$ Вт), ширина різь складає всього 0,05 мм. Зростання потужності призводить до зростання ширини різь.

Глибина різь. Цей параметр залежить від ступеня потужності випромінювання, швидкості різання, виду та тиску газового струменя. Глибина різь зростає зі зростанням потужності. Існує оптимальна швидкість обробки (при заданій потужності), коли глибина різь буде найбільшою.

У багатьох випадках значна глибина різь визначає кількість шарів матеріалу у пакеті, який піддається різанню. Кількість таких шарів може перевищувати 10 – 15. Для попередження зварювання окремих шарів між ними прокладають шари цигаркового паперу.

Якість і точність різь. При обробці синтетичних тканин, склотканин та інших подібних матеріалів кромки різь, як правило, трохи оплавляються, що фіксує форму виробу і попереджує матеріал від розпускання. Товщина дефектного шару не перевищує, звичайно, 0,1 мм.

При товщині матеріалу, що перевищує 1 мм точність різання можна оцінити по параметру клиноподібності. На цей параметр найбільший вплив має швидкість обробки.

Вибір режимів. Режими вибираються експериментально, оскільки властивості матеріалів дуже розрізняються і не завжди є точно встановленими.