

Технологія лазерної розмірної обробки

Презентація 4 (лекції 9-10)
електронний дидактичний демонстраційний матеріал
супроводження дисципліни

ММІ, каф. ЛТФТТ, IVкурс VII семестр
(36 годин лекційний курс, 36 годин лабораторних занять, 180 години із СРС)
5 кредитів

Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ» про (протокол №7 від 27 березня 2014 р.) (свідоцтво НМУ № Е13/14-061)

Автор: проф. Котляров В.П.

Лекція 9

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

- 5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями През. №4. сл.№4
- 5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями През. №4. сл.№12
- 5.3. Дослідження та моделювання операцій ЛРО През. №5. сл.№2
- 5.4. Проектування режимів ЛРО. Одно критеріальні задачі През. №5. сл.№17
- 5.5. Проектування режимів ЛРО. Багато критеріальні задачі През. №8. сл.№2
- Контрольні запитання та завдання През. №8. сл.№17**
- Бібліографічний опис През. №5. сл.№24**
- Додаток до теми 5 (завдання на СРС) През. №5. сл.№25**

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

Класифікація методів визначення режимів лазерної розмірної обробки (ЛРО)

- розрахунки за аналітичними (функціональними) залежностям, які розроблено в результаті кількісного аналізу фізичних, хімічних явищ, що відповідають за процес формування порожнини концентрованим пучком лазерного випромінювання, тому вони можуть вважатися моделями, які пов'язують результати (кількісні та якісні) процесу обробки з параметрами його виконання (режимами обробки): для рішення складної технологічної задачі з багатьма критеріями, що обмежують результати обробки, необхідно мати модель для кожного з них;
- визначення режиму обробки за результатами експериментальних досліджень, що виконуються з метою проектування технологічної операції, які представляються у вигляді таблиць, графіків або математичних (емпіричних) залежностей – моделей (частіше – регресійних);
- поєднуючи можливості перших двох методів, наприклад: визначаючи попередній режимний діапазон для найближчого (до заданого розміру отвору) табличного результату обробки і уточнюючи його параметричним управлінням процесу обробки за вибраною функціональною залежністю.

Тема 5. **Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини**

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

- за аналітичним рішенням рівняння теплопровідності в твердому тілі:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}, \quad (r > 0; z < \infty; t > 0)$$

у вигляді визначення меж ізотерми випаровування або плавлення матеріалу

Недоліки методу - недостатня точність прогнозування внаслідок:

- **приблизності аналітичного рішення;**
- **теплофізичні, оптичні і механічні властивості матеріалу заготовки приймаються незалежними від температури і вважаються постійними протягом обробки;**
- **не враховуються теплові втрати внаслідок теплопровідності та конвекції на граничних поверхнях заготовки та зони термічного впливу;**
- **втрати на віддзеркалення і пере випромінювання вважаються незначними.**

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

- за теорією розмірності – рівняння (5.1 табл.5.1, 5.5 табл. 5.2) [1],
- балансом енергії в зоні обробки (5.2, 5.3 табл. 5.1, 5.6 табл. 5.2) [1]
- феноменологічні моделі (5.4 табл. 5.1, 5.7 табл. 5.2) [1]: Таблица 5.1

№ п/п	Математичні моделі для поперечного розміру порожнини
1	$d = const \left(\frac{\rho}{AE} \right)^b \tau^{1+3b} L_v \frac{5b+1}{2} \quad (5.1)$
2	$d = \left[\frac{12AE}{\pi \rho h [cT_v - c'(T_v - T_{пл}) + L_v + L_{пл}]} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5.2)$
3	$d = \sqrt{\frac{d_0^2}{2} \ln \left[\frac{2AP}{\pi W_p^{пл} d_0^2} \right]} \quad (5.3)$
4	$d = 2\sqrt[3]{r_0^3 + \frac{3AEtg\gamma}{\pi L_v \rho}} \quad (5.4)$

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

Таблиця 5.2

№ п/п	Математичні моделі глибини порожнини
1	$h = \text{const} \left(\frac{\rho}{AE} \right)^k \tau^{1+3k} L_v^{\frac{5k+1}{2}} \quad (5.5)$
2	$h = \frac{W_p \tau}{\rho(cT_v + L_v)} \quad (5.6)$
3	$h = \sqrt[3]{\left(\frac{r_0}{\text{tg}\gamma} \right)^3 + \frac{3AE}{\pi\rho L_v \text{tg}\gamma} - \frac{r_0}{\text{tg}\gamma}} \quad (5.7)$

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

1. Моделі (5.1) та (5.5) [1] побудовані з використанням теорії розмірності (подібності) на базі поправочних коефіцієнтів **Const**, **b**, **k**, одержаних для визначеного експериментальним шляхом показника (**d**, **h**) в декількох реперних точках.
2. Моделі (5.2) та (5.6) [1] побудовані на базі закону збереження енергії в зоні обробки при введенні енергії випромінювання **E** за час τ та формування не наскрізного отвору (лунки) конічної форми діаметром **d** та глибиною **h** за рахунок плавлення та випаровування матеріалу всередині лунки:

$$AE = V\varepsilon = \frac{1}{3} \frac{\pi d^2}{4} h [c\rho T_v - c'(T_v - T_{пл})\rho + L_{пл}\rho + L_v\rho]$$

$$E = \frac{W_p \pi d^2 \tau}{4} = (\rho c T_u + L_u) \frac{\pi d^2}{4} h$$

де: **V** – об'єм конусної лунки, ε – питома енергія для випаровування 1см³.
Із першого рівняння одержана модель (5.2), а із другого – (5.6).

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

3. Модель (5.3) призначена для передвіщення розміру наскрізного отвору у металевих плівках, фользі, тобто у заготовках малої товщини, яка дозволяє не враховувати відтік тепла із зони обробки через стінки порожнини, тобто для порожнин з співвідношенням:

$$h \ll d_0 / 4$$

В якості головного механізму формоутворення отвору в цих умовах є дія сил поверхневого натягнення, які переформують розплавлений наскрізь матеріал (рис. 5.1) в межах зони опромінення в вигляді диска 5 діаметром d_0 в новий об'єм – тор 6, який утворюється вздовж межі зони розплаву. В процесі формування тору, як об'єму з найменшою площею поверхні в умовах доброго змочування розплавленим металом твердого матеріалу у країці зони розплаву, формується отвір, який є внутрішнім отвором тору d . Механізм руйнування – плавлення матеріалу по товщині заготовки в зоні опромінення $d_0 \gg d$ та його часткове випаровування.

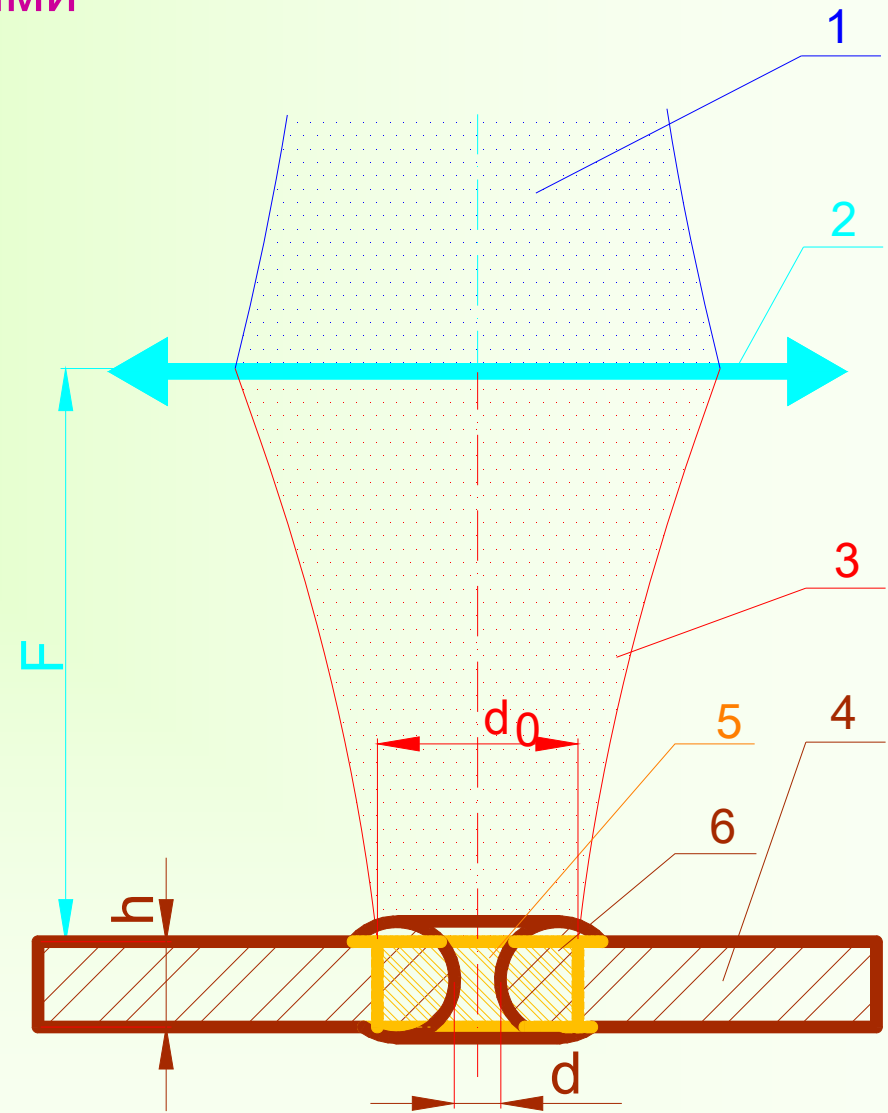


Рис.5.1. Схема утворення отвору силами поверхневого натягнення

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

4. Феноменологічні моделі (5.4) та (5.7) [1д] одержані в результаті рішення балансу енергії в зоні опромінення та на базі швидкісної кінозйомки для визначення геометричних закономірностей утворення повздовжнього профілю лунки (рис.5.2):

$$r(t) = r_0 + tg\gamma h(t)$$

Прийнято, що із дна лунки матеріал випаровується, а зі стінок – вимивається паром у вигляді розплаву:

$$E(t) = P(t)dt = L_e \rho \pi r^2(t) d(h) + L_{nl} \rho 2\pi r(t) h(t) dr$$

Сумісне їх рішення дає можливість визначити закономірності росту розмірів лунки вздовж та поперек його осі:

$$h(t) \cong \left[\frac{3Pt}{\pi * tg^2 \gamma * \rho (L_e + 2L_{nl})} \right]^{\frac{1}{3}} \quad r(t) \cong tg\gamma * h(t) = \left[\frac{3Pt * tg\gamma}{\pi \rho (L_e + 2L_{nl})} \right]^{\frac{1}{3}}$$

Їх перетворення дозволило спростити форму запису залежностей до (5.4) та (5.7)

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

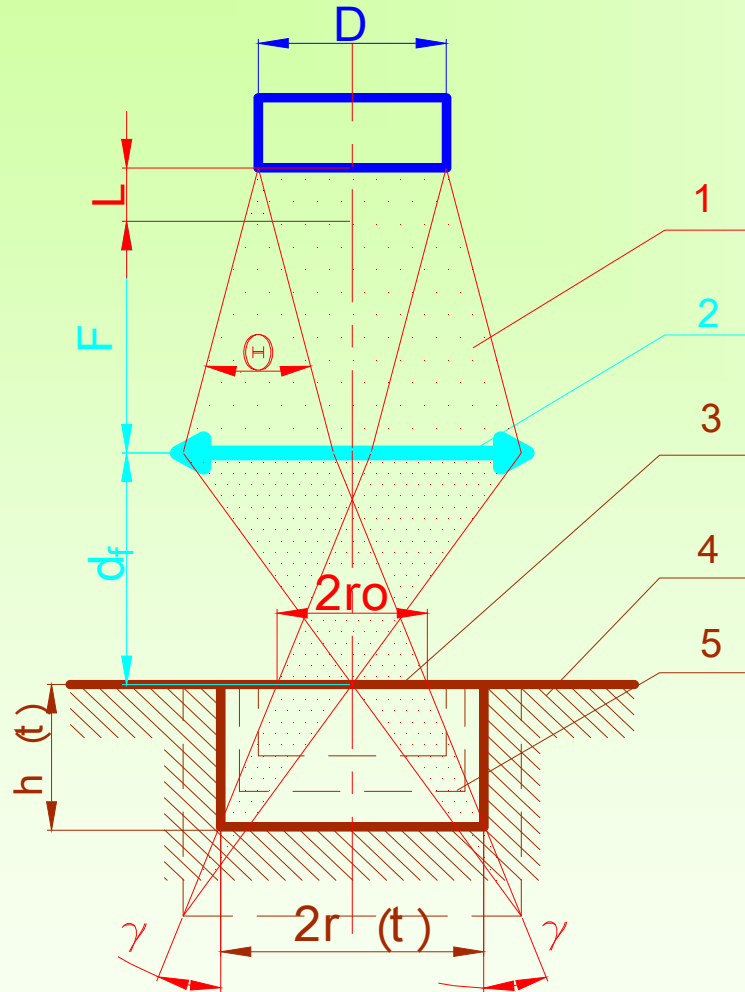


Рис.5.2. Схема формування профілю отвору вздовж світлового конусу

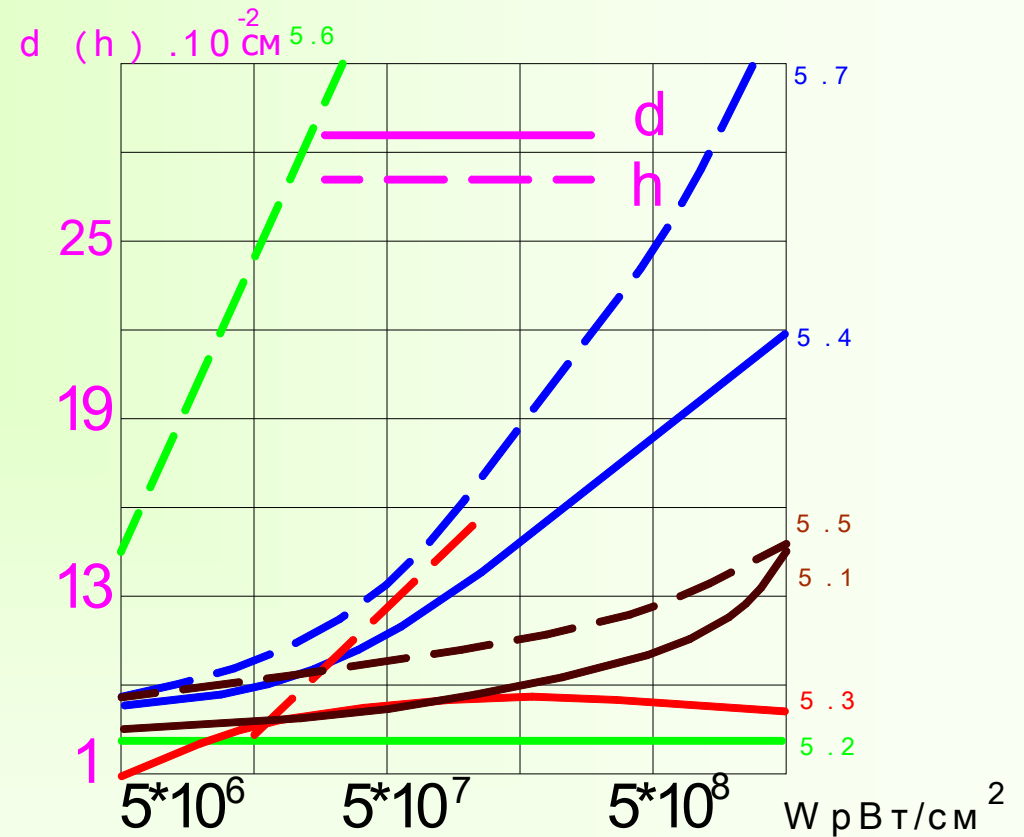


Рис. 5.3. Результати обчислювального експерименту за моделями (5.1) - (5.7) в умовах: AL , $T = 5 \cdot 10^{-4} \text{ с}$, $r_0 = 5 \cdot 10^{-3} \text{ см}$, $\gamma = 16,3^\circ$

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.1. Прогнозування результатів обробки за аналітичними моделями

Таблиця 5.3

№ п/п	Найменування явища	Враховується (+) чи ні (-) в моделі						
		5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7
1	Відбиття енергії випромінювання від поверхні заготовки і факелу руйнування	—	—	—	—	—	—	—
2	Розсіяння енергії випромінювання механічними хвилями в матеріалі та теплопровідністю	—	—	—	—	—	—	—
3	Втрата енергії внаслідок пере випромінюванні	—	—	—	—	—	—	—
4	Викид матеріалу в рідкій і твердій фазі	—	—	—	—	—	—	—
5	Залежність теплофізичних властивостей та поглинання матеріалу від температури заготовки	—	+	—	—	—	+	—
6.	Умови фокусування	—	—	+	+	—	—	+
7.	Періодичність дії енергії випромінювання із-за пічкового характеру введення енергії	—	—	—	—	—	—	—

Лекція 10. Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

1. Обробка отворів розміром $0,08 < d < 0,40$ мм “гладким” імпульсом

Недоліки передвіщення результатів обробки за попередніми аналітичними моделями пов’язані зі спрощеним представленням механізму формування отвору та обставин виконання операції. До того ж форма запису моделей із залежністю функцій від декількох аргументів не дає можливості однозначно визначити рівні факторів. Найбільший вклад в формування похибок передвіщення дає невизначеність реального характеру постачання енергії в зону опромінення, що пов’язано з хаотичністю часової та енергетичної будови імпульсу випромінювання в режимі ВГ та відсутність точного аналітичного рішення диференціального рівняння теплопровідності твердих тіл (рівняння трансцендентне).

Перша складність вирішується виконанням умови стабілізації режиму подачі енергії:

- виключенням пічковості із структури імпульсу, тобто шляхом застосування “гладкої” його форми (рис. 5.4): це можливо за умови забезпечення однорідності поля накачування в об’ємі активного середовища;
- стабілізацією структури пічков шляхом штучної часової модуляції випромінювання.

Для усунення другої складності з метою одержання приблизного, але достатньо коректного рішення рівняння теплопровідності, воно створюється для однієї групи матеріалів, причому в вигляді окремих рішень для конкретних технологічних задач.

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

А. Обробка імпульсами випромінювання вільної генерації (ВГ)

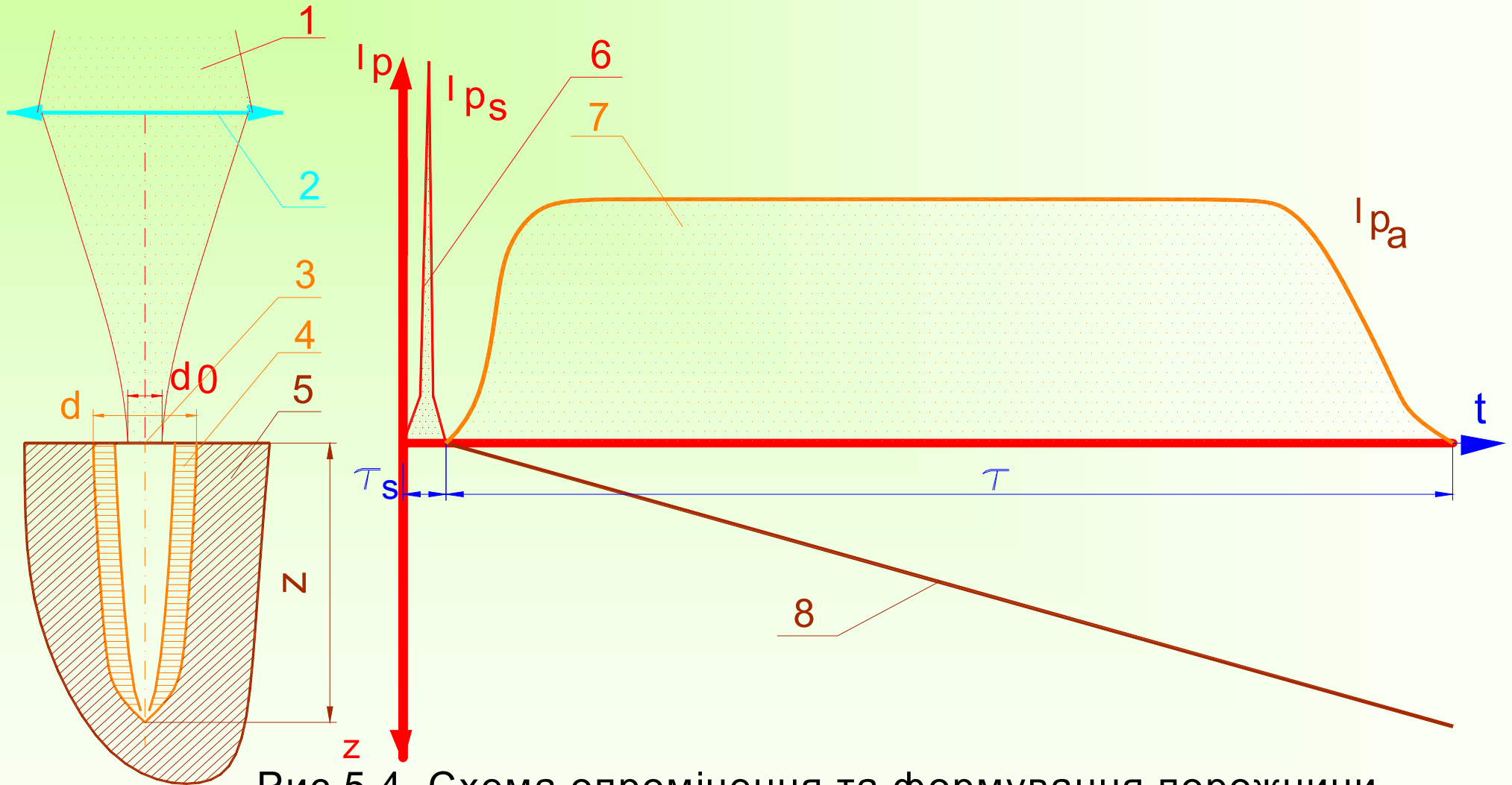


Рис.5.4. Схема опромінення та формування порожнини квазістаціонарним імпульсом лазерного випромінювання

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

А. Обробка імпульсами випромінювання вільної генерації

При обробці з малим ефективним періодом часу теплових процесів ($t \ll d^2/4a$), коли можна нехтувати відводом тепла через стінку отвору, що обробляється, із рівняння теплопровідності можна одержати секундний баланс енергії у такій формі:

$$E = 1\text{с} \times 1\text{сМ}^2 = W_{pa} = \rho L_e \frac{dZ(t)}{dt} + \frac{kT_e}{2} \sqrt{\frac{\pi}{dt}} + kT_e \sqrt{\frac{\pi}{dt}} \frac{r(t)}{r}$$

В загальному вигляді ця залежність не вирішується, тому автором розглянуто деякі варіанти її спрощення:

для матеріалів з такими властивостями:

$$\frac{L_e \rho}{T_e c} \cong 5 \quad T_{пл} \approx 1/2 T_e$$

глибину розплавленого шару вздовж осі отвору можна визначити:

$$r_{пл}(t) = \left(1 - \frac{T_{пл}}{T_e}\right) \cdot \sqrt{\frac{at}{\pi}}$$

а в радіальному напрямку:

$$r_{пл}(t) - r \approx 0,7 \cdot \sqrt{at}$$

Швидкість обробки порожнини збільшиться внаслідок виносу розплаву із дна отвору:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{W_{pa}}{\rho L_e} - \frac{k \cdot T_e}{2 \cdot L_e \rho} \cdot \sqrt{\frac{\pi}{dt}} \cdot \left(1 + \frac{2z}{r}\right) + 0,35 \sqrt{\frac{a}{t}}$$

Швидкість поглиблення отвору в металевих заготовках:

$$\frac{dZ}{dt} = \frac{W_{pa}}{\rho L_e} + 0,17 \cdot \sqrt{\frac{a}{t}} \left(1 - \frac{2Z}{r}\right) \quad (5,8)$$

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

А. Обробка імпульсами випромінювання вільної генерації

5.2.1. Обробка порожнин в тонких заготовках ($z \ll d/4$)

для цих отворів глибина порожнини збільшується (за рішенням рівняння (5.8)):

$$Z = \frac{W}{L_{\epsilon\rho}} \cdot t + 0,35 \cdot \sqrt{at}$$

Порядок визначення режимів обробки

а. розрахункова тривалість імпульсу випромінювання τ_p при $W_{pa} = 10^7 - 10^8 \text{Вт/см}^2$:

$$\tau_p = \frac{L_{\epsilon\rho}}{W_{pa}} Z$$

б. інтенсивність пучка випромінювання для дійсного значення τ_d :

$$I_{pad} = W_{pad} / A = \frac{L_{\epsilon\rho}}{A\tau_d} (Z - 0,35\sqrt{a\tau_d})$$

в. імпульсна енергія випромінювання E_a :

$$E_a = W_{pad} \cdot \tau_d \cdot \frac{\pi}{4A} d_0^2 = \frac{\pi}{4A} \cdot d_0^2 \rho L_{\epsilon} (Z - 0,35\sqrt{a\tau_d})$$

г. діаметр пучка випромінювання на поверхні заготовки відповідає діаметру отвору, що обробляється, тому що вплив теплопровідності обмежений із-за незначної товщини заготовки, тобто:

$$d_0 = d$$

д. для обраного об'єктиву з фокусною відстанню F необхідний кут розбіжності пучка на об'єктиві визначається за приблизним співвідношенням:

$$\theta \approx d_0 / F$$

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями А. Обробка імпульсами випромінювання вільної генерації

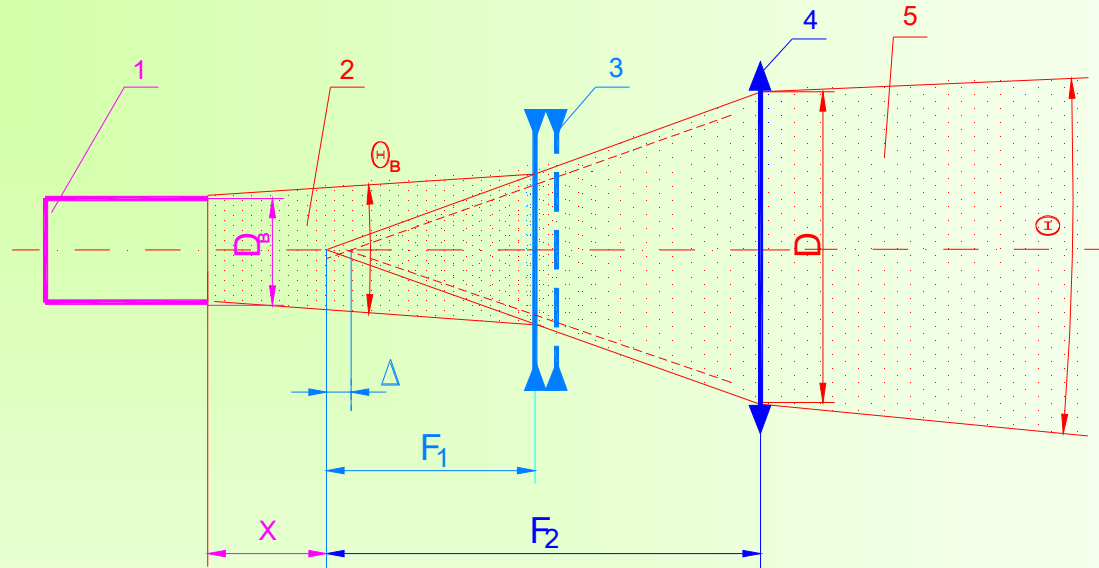


Рис.5.5. Перетворення телескопом Галілея пучка лазерного випромінювання

- е). для надання пучку лазерного випромінювання 2 (рис. 5.5) необхідного значення кута розбіжності θ в ЛТУ застосовуються телескопічні системи (Кеплера або Галілея), які характеризуються збільшенням $\Gamma = -F_3/F_4$:
- якщо $\theta < \theta_{\epsilon}$, то $\Gamma = \theta/\theta_{\epsilon}$;
 - в разі $\theta > \theta_{\epsilon}$, а також, якщо неможлива реалізація умов попереднього завдання, необхідно обрати телескоп із збільшенням, наближеним до розрахункового та виконати його розлад (відносно зміщення лінз) на величину Δ , яку визначають з рівняння (умовні позначення – на рис. 5.5):

$$\Delta_{1,2} = 0,5\left(\frac{D_{\epsilon}}{2\theta_{\epsilon}} + x\right) \pm \left[\frac{1}{4}\left(\frac{D_{\epsilon}}{2\theta_{\epsilon}} + x\right)^2 + \left(\frac{F_1^2\theta}{\Gamma\theta_{\epsilon}} - F_1^2\right)\right]^{1/2}$$

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями А. Обробка імпульсами випромінювання вільної генерації

5.2.2. Обробка порожнин в заготовках товщиною: $4Z / d \gg 1$

Збільшення товщини заготовки призводить до необхідності подовження часу опромінення, тому частина теплової енергії оплавляє стінки отвору, тобто розмір отвору буде перевищувати розмір інструменту – пучка випромінювання. Порядок визначення режиму обробки залишається попереднім, але за декілька іншими залежностями:

а. Тривалість опромінення τ_p :
$$\tau_p = \frac{L_e \rho}{W_{pa}} Z$$

б. Інтенсивність випромінювання для дійсного значення тривалості імпульсу τ_∂ :

$$I_{pa\partial} = W_{pa\partial} / A = \frac{\rho L_e}{A \tau_\partial} \cdot Z \cdot \frac{d - 0,7 \sqrt{a \tau_\partial}}{d - 1,2 \sqrt{a \tau_\partial}}$$

в. Імпульсна енергія випромінювання E_a :

$$E_a = W_{pa\partial} \tau_\partial \frac{\pi}{A4} d_0^2 = \frac{\pi}{A4} Z \rho L_e \frac{(d - 0,7 \sqrt{a \tau_\partial})^3}{(d - 1,2 \sqrt{a \tau_\partial})}$$

г. Діаметр пучка випромінювання на поверхні заготовки необхідно зменшити на величину прирощення розміру отвору вимиванням розплаву зі стінок:

$$d_0 = d - 0,7 \sqrt{a \tau}$$

д. Інші параметри пучка випромінювання та умов опромінення визначаються за рівняннями та порядком, наведеним на слайдах 15 -16.

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями А. Обробка імпульсами випромінювання вільної генерації

5.2.3. Обробка глибоких порожнин без вхідного конусу та ґрату $0.15 \leq Z/d \leq 10$:

а. Тривалість імпульсу обмежується внаслідок оптимізації кількості енергії, яка необхідна для формування порожнини глибиною Z :

тоді:

$$\tau_p = 0,33 \frac{d^2}{a}$$
$$\frac{d}{dt} \cdot \left(\frac{E_a}{\left(\pi \frac{d^2}{4} Z \right)} \right) = 0$$

б. Інтенсивність:

$$I_{pa0} = W_{pa0} / A = 5,5 \frac{Z L_e \rho a}{A d^2}$$

в. Імпульсна енергія E_a :

$$E_a = 0,5 Z \rho L_e d^2 / A$$

г. Діаметр пучка на поверхні заготовки:

$$d_0 = d$$

д. Інші параметри пучка випромінювання та умов опромінення визначаються за рівняннями на слайді 15 та 16.

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

А. Обробка імпульсами випромінювання вільної генерації

5.2.4. Обробка отворів в заготовках із теплопровідних матеріалів (мідь, золото, алюміній, тощо)

1. Обробка тонких заготовок

2. Обробка глибоких порожнин

$$4Z/d \gg 1$$

$$0.15 \leq Z/d \leq 10$$

а. $\tau_p \leq 10^{-2} \frac{Z^2}{a}$

а. $\tau_p \leq 1,6 \cdot 10^{-2} \frac{r^2}{a} = 4 \cdot 10^{-3} \frac{d^2}{a}$

б. $I_{рад} = W_{рад} / A = Z \frac{\rho L_e}{A \tau_\partial} \geq 10^2 \cdot \frac{\rho L_e a}{AZ}$

б. $I_{рад} = W_{рад} / A = Z \frac{\rho L_e}{A \tau_\partial} \geq 250 Z \frac{L_e}{Ad^2}$

в. $E_a = \frac{\pi}{A4} d^2 Z \rho L_e$

в. $E_a = \frac{\pi}{4A} d^2 Z \rho L_e$

г. $d_0 = d$

г. $d_0 = d$

д. Інші параметри пучка випромінювання і умов опромінення визначаються за залежностями слайд15 і 16

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями

Б. Обробка отворів ($d < 0,40$ мм) модульованими імпульсами випромінювання

В технологічній операції за попередньою схемою обробки ускладнення технологічної задачі супроводжується підвищенням інтенсивності в зоні опромінення при зниженні тривалості “гладкого” імпульсу випромінювання. Однак, **відсутність перерв** в подачі енергії обмежують подальше підвищення якості обробки при досягненні **інтенсивності рівня $I_{pa} > 10^8$ Вт/см²**, коли ерозійний факел стає **непрозорим** для випромінювання і подальше його підвищення не раціональне. Для більш складних технологічних задач необхідне використання **регулярної послідовності енергетичних пічків**, яка створюється в результаті **модуляції** процесу генерації різними методами.

Для створення комплексу розрахункових залежностей автором висунуто деякі умови та прийнято такі припущення:

- **заготовка розташовується у горловині каустики пучка випромінювання, перетвореного лінзою, тобто $\Delta F = 0$;**
- **структура пічків, утворюючих імпульс випромінювання регулярний у часі та енергетично: $\tau_{s1} = \dots \tau_{si} \dots = \tau_N$; $t_{s1} = \dots t_{si} \dots = t_{sN}$;**
- **прирощення глибини від діяння кожного пічка однакові:**

$$\Delta_1 = \dots \Delta_i \dots = \Delta_N.$$

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями Б. Обробка отворів ($d < 0,40$ мм) модульованими імпульсами випромінювання

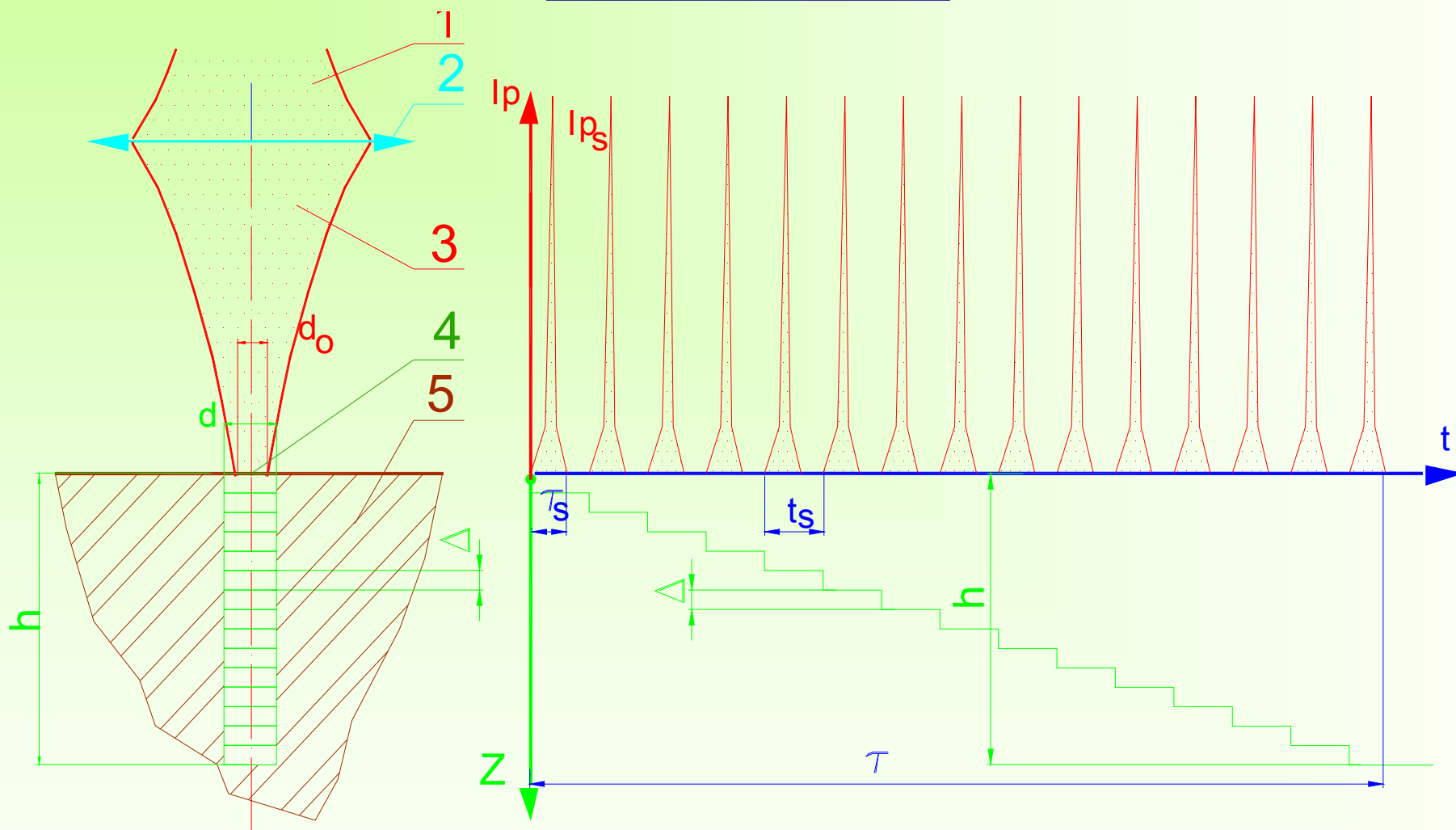


Рис.5.6. Схема опромінення та формування порожнини регулярною послідовністю пічків лазерного випромінювання 21

Тема 5. Методи визначення режиму лазерної обробки порожнини

5.2. Проектування режимів ЛРО за аналітичними моделями Б. Обробка отворів ($d < 0,40$ мм) модульованими імпульсами випромінювання

Порядок розрахунку режимів обробки

а. Пічкова інтенсивність випромінювання обирається із умови:

$$I_{ps} = W_{ps} / A \text{ (де } W_{ps} > 10^8 \text{ Вт/см}^2\text{)}$$

б. Необхідна для цього тривалість імпульсу випромінювання τ_s : $\tau_{sp} \leq 4 \cdot 10^{-3} \frac{d^2}{a}$

в. Приріст глибини порожнини від дії одного пічка Δ_j : $\Delta_j = W_{ps} \cdot \frac{\tau_{s\partial}}{\rho L_e}$

г. Частота надходження пічків $f \approx 1 / t_s$, де t_s – період надходження пічків, V_e – швидкість розльоту ерозійних часток: $\frac{Z}{V_e} < t_s - \tau_{s\partial} < \frac{7.5d^2}{a}$

д. Необхідна кількість пічків для формування порожнини глибиною Z : $N = Z / \Delta_j$ ($Z = \sum_{i=1}^n \Delta_j$)

е. Тривалість пачки пічків (імпульсу) $\tau = N t_s$

ж. Сумарна імпульсна енергія E_a : $E_a = N \tau_s W_{ps} \frac{\pi d^2}{4A} = \frac{\pi}{4A} d^2 L_e \rho$

з. Діаметр пучка випромінювання на поверхні заготовки $d_0 = d$

і. Інші параметри пучка випромінювання і умов опромінення визначаються за залежностями слайдів 15 та 16