

# Технологія лазерної розмірної обробки

Презентація 2 (лекції 3-6)

**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.**

# Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

3.1. Обставини та умови проектування

През. №2, сл.№3

3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

През. №2, сл.№4

Контрольні запитання та завдання

През. №2, сл.№8

Бібліографічний опис

През. №2, сл.№10

**Додаток до теми 3: завдання на СРС**

**През. №2, сл.№11**

# Лекція 3. Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

## 3.1. Обставини та умови проектування

При визначенні параметрів, відповідних за процес обробки, проєктант повинен виконати вимоги ТЗ від конструктора з урахуванням властивостей заготовки і її матеріалу.

Таблиця 3.1.

Технічне завдання	Властивості оброблюваної заготовки	Параметри процесу обробки
<p><u>Порожнина (отвір):</u></p> <p>1. Тип:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- глуха,</li> <li>- крізна</li> </ul> <p>2. Форма порожнини (отвору):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- поперечна (кругла, кільцева, прямокутна, фасонна);</li> <li>- подовжня (циліндрична, конічна, фасонна)</li> </ul> <p>3. Розміри порожнини (отвору):</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- діаметр,</li> <li>- глибина,</li> <li>- відносна глибина</li> </ul> <p>4. Якість обробки:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- погрішність розмірів;</li> <li>- шорсткість поверхні;</li> <li>- відхилення форми;</li> <li>- глибина і властивості зони термічного впливу</li> </ul>	<p><u>Матеріал заготовки:</u></p> <p>1. Оптичні властивості  поверхні:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- поглинальні,</li> <li>- відбивні</li> </ul> <p>2. Теплофізичні властивості:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- питома теплота плавлення і випару,</li> <li>- температура плавлення і випару,</li> <li>- температуропровідність,</li> <li>- теплопровідність,</li> <li>- ентальпія,</li> <li>- щільність,</li> <li>- енергія паротворення</li> </ul> <p>3. Механічні властивості:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- межа міцності,</li> <li>- твердість,</li> <li>- питома в'язкість,</li> <li>- відносне видовження,</li> <li>- модуль пружності I та II роду)</li> </ul> <p>4. Хімічні властивості:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- активність по відношенню до кисню,</li> <li>- активність по відношенню до водню,</li> <li>- активність по відношенню до азоту,</li> <li>- активність по відношенню до вуглецю</li> </ul> <p><u>Характеристики заготовки:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- товщина в зоні обробки,</li> <li>- точність розмірів,</li> <li>- конфігурація заготовки (форма її поверхні, положення оброблювального елемента відносно останньої)</li> </ul>	<p><u>1. Тип лазера:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- довжина хвилі випромінювання.</li> </ul> <p><u>2. Режим опромінення :</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- безперервний,</li> <li>- імпульсний (вільна генерація, моно імпульс, періодична послідовність пічків)</li> </ul> <p><u>3. Параметри пучка випромінювання:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- імпульсна енергія,</li> <li>- потужність (середня, миттєва, пічкова),</li> <li>- тривалість імпульсу випромінювання,</li> <li>- частота,</li> <li>- кількість імпульсів,</li> <li>- розміри і форма поперечного перетину пучка випромінювання,</li> <li>- розподіл інтенсивності по перетину пучка випромінювання,</li> <li>- кут розбіжності,</li> <li>- діаметр пучка випромінювання.</li> </ul> <p><u>4. Умови опромінення:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- параметри перетворюючого елемента (фокусна відстань, поперечні розміри і форма перетворюючої поверхні),</li> <li>- положення заготовки відносно перетворюючого елемента</li> </ul>

## Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

### 3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

1. Обґрунтовано вибрати метод обробки заданого елемента виробу, користуючись даними табл. 1.1, змісту рис.1.1 та 1.2, або з відповідної довідкової літератури, наприклад, [5].
2. Вибрати технологічну схему обробки (вид і розміри інструменту – пучка лазерного випромінювання, відносне розташування останнього і заготовки, характер та параметри переміщень протягом технологічної операції).
3. Визначити значення параметрів пучка лазерного випромінювання, оптимальні з точки зору досягнення заданого розмірного і якісного ефекту з максимальною (необхідною) продуктивністю:
  - енергії випромінювання  $E$  (Дж);
  - тривалості опромінення  $t$  (с) (імпульсу випромінювання  $\tau$  (с) та його часової структури:  $\tau_s$  та  $t_s$ );
  - кута розбіжності пучка випромінювання  $\theta$  (рад);
  - кількості імпульсів випромінювання  $N$  (шт.);
  - частоти находження імпульсів  $f$  (Гц):  $f = 1/t_s$ .

## Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

### 3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

4. Вибрати умови обробки – форму і поперечні розміри сконцентрованого пучка лазерного випромінювання, розподіл інтенсивності по його перетину, а також положення заготовки відносно характерних площин каустики перетвореного пучка і режим їх взаємного переміщення в процесі обробки, для чого необхідно визначити:

- фокусну відстань перетворюючого елемента (дзеркала, лінзи, або їх системи):  $F$  (мм);
- тип його заломлюючих або відбиваючих поверхонь (сферична, циліндрична, конічна, параболічна, або інша);
- збільшення окуляра наглядової системи:  $\Gamma$  (раз);
- метод обробки (у площині горловини каустики перетвореного пучка випромінювання, із зсувом  $\pm \Delta F$ ; у площині проєкції маски, шаблону; у циліндричній світловій трубці);
- методи налаштування оптичної системи (візуальний, аналоговий або автоматичний).

## Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

### 3.2. Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

5. Вибрати лазерну технологічну установку (ЛТУ):
  - за довжиною хвилі випромінювання  $\lambda$ ;
  - за характеристиками пучка випромінювання ( $E$ ,  $\tau$ ,  $\theta$ ,  $N$ ,  $f$ );
  - за параметрами перетворюючих елементів ( $F$ ,  $\Delta F$  та іншими);
  - враховуючи продуктивність режиму роботи її лазера.
6. Встановити методи налаштування технологічного режиму роботи лазера:
  - енергії імпульсу  $E$  (зміною енергії накачування активного елемента; діафрагмуванням пучка випромінювання з апертурою  $D_d$ ; ослабленням випромінювання фільтрами або комплексом перерахованих прийомів);
  - тривалість імпульсу  $\tau$  (зміною параметрів формуючій лінії накачування – індуктивності  $L_H$ , ємкості  $C$ , напругою живлення лампи накачування  $U_H$ ; використанням затворів або комплексом перерахованих прийомів);
  - кута розбіжності пучка випромінювання  $\theta$  (зміною енергії накачування активного елемента  $E_H$ ; діафрагмуванням пучка зовні або усередині резонатора  $D_o$ ; використанням оптичних засобів: телескопів, одиночних лінз або комплексом перерахованих прийомів).

# Лекція 4. **Тема 3.** Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

## **3.2.** Алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

7. Передбачити (у разі потреби) заходи додаткового вдосконалення процесу обробки з метою:

- підвищення якості обробки (точність розмірів, зниження шорсткості поверхні, покращення макрогеометрії стінок порожнини);
- розширення розмірного ряду обробки, що досягається на наявній технологічній установці;
- автоматизації технологічної операції, що включає етапи завантаження і вивантаження заготовок, контролю над процесом обробки за розмірними і якісними показниками;
- створення адаптивної форми організації технологічної операції з автоматичним забезпеченням розмірних і (або) якісних результатів обробки;
- вживання ЛРО в гнучких виробничих системах.

8. Визначити економічну ефективність процесу за відповідними методами, використовуючи один з наступних виразів для оцінки машинного часу, необхідного для отримання порожнини (отвору) заданих якостей:

- для обробки одним імпульсом порожнини при їх  $k$  штуках в одній заготовці:

$$T_{\text{маш}} = k\tau$$

- для багато імпульсної обробки порожнини в заготовці з  $k$  порожнинами:

$$T_{\text{маш}} = kN(\tau + 1/f)$$

# Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

## *Контрольні запитання та завдання*

- 3.1. За яких умов повинно виконуватися проектування технологічної операції ЛРО?
- 3.2. Хто та які умови висуває до проектуємої технологічної операції (або до технолога з лазерної обробки)?
- 3.3. Які параметри пучка випромінювання використовують для керування результатами ЛРО?
- 3.4. Якими параметрами опромінення можна впливати на результати технологічної операції ЛРО?
- 3.5. За якими критеріями потрібно порівнювати конкурентні методи обробки порожнини?
- 3.6. Які дані звичайно включають в технологічні схеми обробки порожнини?



## Тема 3. Умови та алгоритм проектування технологічної операції ЛРО

### *Контрольні запитання та завдання*

- 3.7. За якими ознаками вибирають лазерну технологічну установку для спроектованої операції?
- 3.8. Яким чином можна змінювати імпульсну енергію випромінювання?
- 3.9. Як можна впливати на тривалість імпульсу випромінювання?
- 3.10. За допомогою яких засобів та прийомів змінюють кут розбіжності пучка випромінювання?
- 3.11. В яких обставинах потрібно використовувати додаткові заходи додаткового вдосконалення технологічної операції ЛРО?
- 3.12. Які напрямки додаткового впливу на технологічну операцію ЛРО?
- 3.13. Порядок проектування технологічної операції ЛРО.
- 3.14. За якими залежностями розраховують машинний час, необхідний для обробки в заготівці порожнини (порожнин) заданої якості?

## Бібліографічний опис до Теми 3

### Основна:

1. Котляров В.П. Технологія лазерної обробки (операції розмірної обробки). Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, - 2010. – 308с. стор. 24-26.
2. Справочник по технологии лазерной обработки / В.С.Коваленко, В.П.Котляров, В.П.Дятел и др. Киев.: Техніка, - 1985. с 167. стор. 36

### Додаткова:

2. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюра Н.И. Технологические процессы лазерной обработки. – М: МГТУ им. Баумана, 2008. – 664с стор. 35-40. стор. 41-43

## **Додаток до теми 3: Завдання на СРС**

- 1. Навести** можливості ЛРО відносно показників обробки отворів (лунок). Які **параметри заготовки** повинні бути враховані при проектуванні технологічної операції ЛРО? Які шляхи керування технологічною операцією необхідно використовувати для виконання ТЗ на операцію?
- 2. Навести** перелік факторів, які впливають на результати розмірної обробки лазерним променем, розподіляючи їх на ті, що керують процесом взаємодії пучка та заготовки, та ті: від стану яких залежить результат. Класифікація розмірних, якісних та показників продуктивності операцій обробки отворів.
- 3. Виділити** з наступного переліку факторів ті, що є умовами обробки, та ті, що дозволяють систематично впливати на процес обробки лазерним променем отворів (кількісні та якісні результати): **енергія випромінювання  $E$** , **теплоємність матеріалу заготовки  $c_p$** , **питома щільність матеріалу  $\rho$** , **подовженість опромінювання  $\tau$** , **діаметр  $D$**  та **кут розбіжності  $\theta$**  пучка випромінювання, **шорсткість поверхні заготовки  $R_z$** , її **товщина  $\delta$**  у місці обробки, **розподіл інтенсивності** у перерізі променю  **$I_p$** , **довжина хвилі випромінювання  $\lambda$** , температура плавлення  **$T_{пл}$**  та випарування  **$T_v$** , **питома енергія руйнування матеріалу  $L_v$** , його активність по відношенню до кисню, азоту, вуглецю, **кут падіння променю** на заготовку.

## Додаток до теми 3: Завдання на СРС

4. **Навести** алгоритм проектування операції лазерної розмірної обробки.
5. Які методи використовуються для встановлення режиму опромінювання на технологічному обладнанні? Засоби додаткового вдосконалення операції.
6. Визначити економічну ефективність розробленої операції шляхом розрахунку машинного часу для економічних оцінок.  
Розрахувати машинний час виготовлення одного виробу з лазерною прошивкою отворів за таких умов:
  - заготовка має один отвір ( $k = 1$ ), який обробляється одним імпульсом ( $N = 1$ ) тривалістю  $\tau = 300$  мкс;
  - заготовка має сім отворів ( $k = 7$ ), кожний з котрих обробляється одним імпульсом тривалістю  $\tau = 500$  мкс з частотою їх надходження  $f = 2$  Гц;
  - заготовка має один отвір ( $k = 1$ ), який обробляється шістьма імпульсами тривалістю  $\tau = 300$  мкс  $f = 12$  Гц;
  - заготовка має сім отворів ( $k = 7$ ), кожний з котрих обробляється шістьма імпульсами тривалістю  $\tau = 300$  мкс ( $N = 6$ ) з частотою їх надходження  $f = 2$  Гц.

## Лекція 5

### Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

- 4.1. Методи управління формою попереку порожнини През. №2. сл.№14
- 4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту През. №2. сл.№18
- 4.3. Схеми формоутворення глибоких отворів з малим попереком През. №3. сл.№2
- 4.4. Схеми обробки точних та отворів складного профілю През. №3. сл.№10
- 4.5. Методи управління повздовжньою формою порожнини През. №3. сл.№21
- Контрольні запитання та завдання През. №3. сл.№26**
- Бібліографічний опис През. №3. сл.№29**
- Додаток то теми 4: завдання на СРС През. №3. сл.№30**

## Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

### 4.1. Методи управління формою попереку порожнин

Прийнято розрізняти дві форми поперечного перетину порожнин: кругла і фасонна. До останньої відносяться: овальні, багатогранні, кільцеві порожнини і ін.

Залежно від розмірів порожнини і профілю застосовують **три технологічні схеми** їх формоутворення пучком лазерного випромінювання (рис. 4.1, де 1 – промінь, 2 – маска (трафарет), 3 – об'єктив, 4 – каустика перетвореного променя, 5 – заготовка, 6 – зона опромінення, 7 – оброблювальний елемент, 8 – траєкторія руху променя, 9 - паз):

- з видаленням матеріалу одночасно зі всього поперечного перетину порожнини (а);

# Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

## 4.1. Методи управління формою попереку порожнин (подовження)

- профілювання порожнини методом обходу контуру її поперечного перетину (б)
- комбінований спосіб (в).

За першою схемою обробки (а) форма поперечного перетину порожнини 7 в деякому масштабі відповідає формі перетину 6 перетвореного лазерного променя 4 на поверхні заготовки 5, а її розміри ( $X$ ,  $Y$ ) визначаються розмірами пучка ( $a$ ,  $b$ ), режимом обробки і теплофізичними властивостями матеріалу.

У другому випадку (б) контур поперечного перетину подібний до траєкторії відносного переміщення лазерного променя 4 і оброблюваної заготовки 5, а його розміри ( $X$ ,  $Y$ ) підсумовуються з величин переміщень у кожному напрямку перетину (наприклад, траєкторією 8 обертання заготовки 5  $\omega$ ) і ефективного розміру одиничної зони обробки 6 перетвореним лінзою 3 пучком випромінювання 1 (ширини різку  $d_0$ ).

Форма поперечного перетину за комбінованою схемою обробки (в) повторює форму пучка 6 на поверхні заготовки вздовж однієї координати ( $X$ ) і формується суперпозицією 9 цих форм вздовж іншої ( $Y$ ). Також визначаються і розміри поперечного перетину порожнини, отриманої за цим методом.

**Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів**  
**4.1. Методи управління формою попереку порожнин (подовження)**

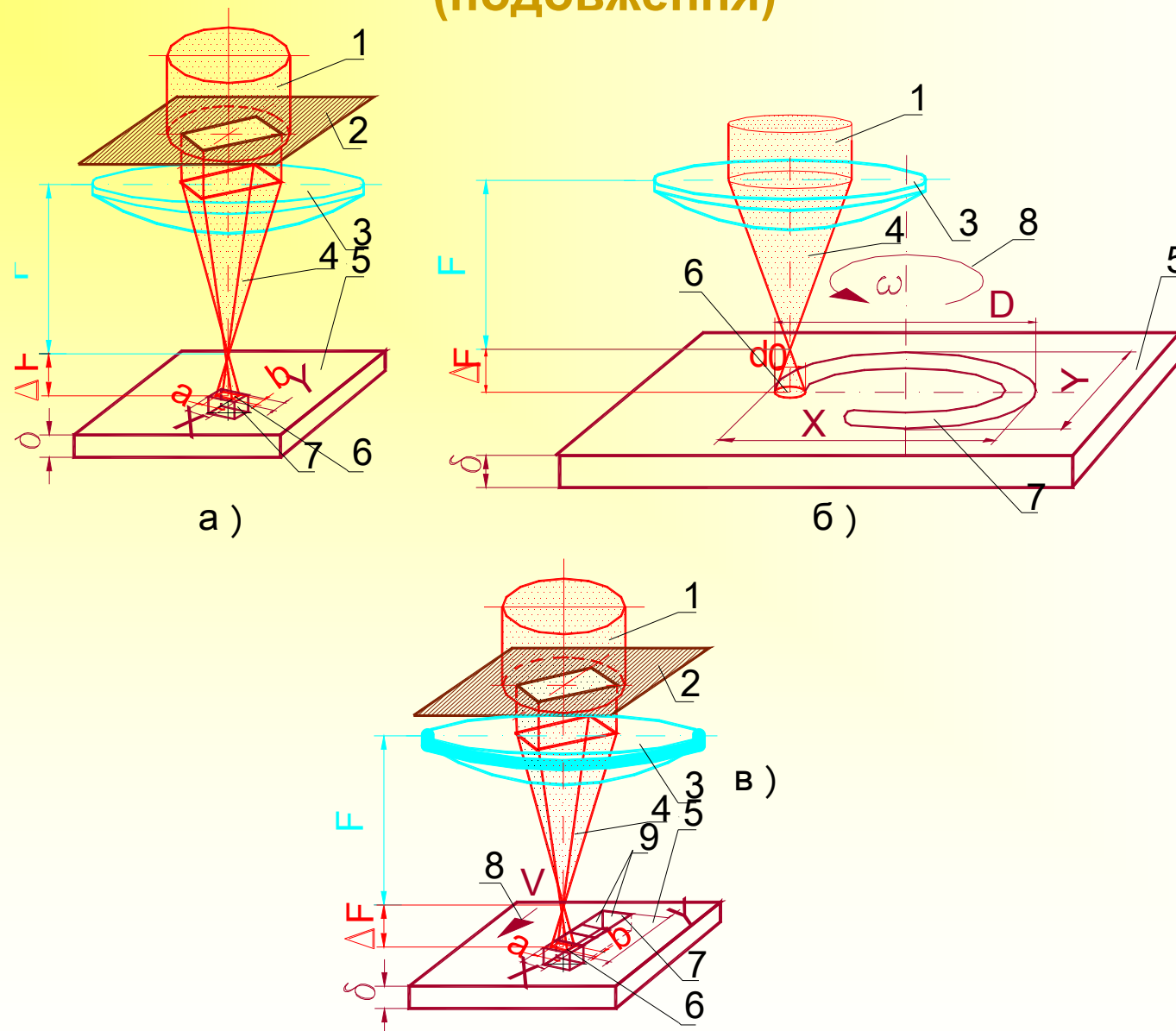


Рис. 4.1. Технологічні схеми формоутворення попереку порожнин пучком лазерного випромінювання



## Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

### 4.1. Методи управління формою попереку порожнин (подовження)

Отже, форма і розміри перетвореного пучка лазерного випромінювання на поверхні заготовки в тій або іншій мірі (залежно від режимів обробки) визначають форму і розміри поперечного перетину оброблювальної порожнини за будь-якою схемою обробки. Тому завдання формування пучків лазерного випромінювання з необхідними розміром і конфігурацією поперечного перетину є визначальним не лише при обробці за першим методом, але і для інших.

**Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів**  
**4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту**  
**А. Для обробки порожнин простої поперечної форми**

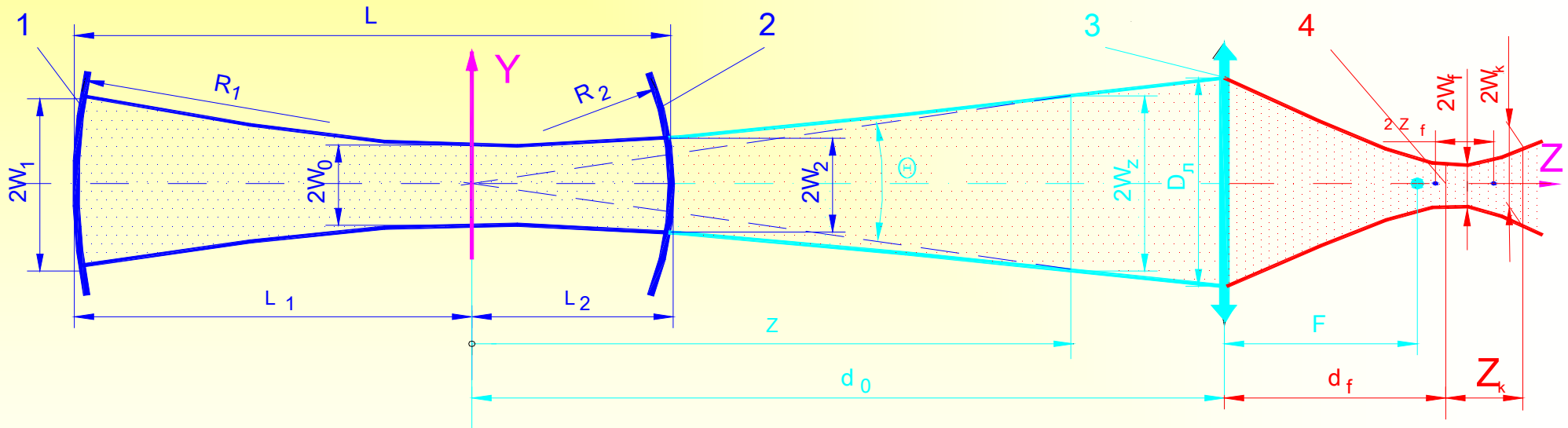


Рис.4.2. Схема формування каустики пучка випромінювання усереднені (- - -), зовні (- - -) резонатору та після перетворюючого елемента (лінзи) (- - -)

**Тема 4.** Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів  
**4.2.** Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту

**А.** Для обробки порожнин простої поперечної форми (подовження)

а). Для лазера, що працює на основній моді ( $TEM_{00}$ ), каустика усередині резонатора має такі розміри:

1. Розміри пучка на дзеркалах резонатора:

$$w_1^4 = \left( \frac{\lambda R_1}{\pi} \right)^2 \frac{R_2 - L}{R_1 - L} \frac{L}{R_1 + R_2 - L} \quad (4.1)$$

$$w_2^4 = \left( \frac{\lambda R_2}{\pi} \right)^2 \frac{R_1 - L}{R_2 - L} \frac{L}{R_1 + R_2 - L} \quad (4.2)$$

якщо  $R_1 = R_2 = R$ , то  $w_1 = w_2 = w$ :

$$w^4 = \left( \frac{\lambda R}{\pi} \right)^2 \left[ \left( \frac{2R}{L} \right) - 1 \right]^{-1} \quad (4.3)$$

**Тема 4.** Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів  
**4.2.** Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту

**А.** Для обробки порожнин простої поперечної форми (подовження)

**2.** Радіус перетяжки (горловини) каустики усередині резонатора:

$$w_0 = \frac{w_i}{\left[1 + \left(\frac{\pi w_i^2}{\lambda R_i}\right)^2\right]^{1/2}} \quad (4.4),$$

якщо  $R_2 = \infty$  (плоске дзеркало), то:  $w_2 = w_0$ :

$$w_2^4 = w_0^4 = \left(\frac{\lambda}{\pi}\right)^2 L(R_1 - L) \quad (4.5),$$

тоді розмір пучка на дзеркалі 1:

$$w_1^4 = \left(\frac{\lambda R_1}{\pi}\right)^2 \left(\frac{R_1}{L} - 1\right)^{-1} \quad (4.6)$$

**Тема 4.** Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів  
**4.2.** Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту

**А.** Для обробки порожнин простої поперечної форми (подовження)

**3.** Положення перетяжки відносно дзеркал резонатора:

$$L_1 = \frac{L(R_1 - L)}{R_1 + R_2 - 2L} \quad (4.7)$$

при  $R_1 = R_2$ :

$$L_1 = L_2 = L/2$$

при  $R_1 (R_2) = \infty$ :

$$L_2 (L_1) = L$$

## Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин

отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів

### 4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту

*А. Для обробки порожнин простої поперечної форми (подовження)*

**б). Параметри каустики пучка за межами резонатора**

**(для  $TEM_{00}$ ) :**

**1. Радіус пучка у перетині на відстані  $Z$  від перетяжки резонатора:**

$$w_z = w_0 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.8)$$

**2. Кут розбіжності пучка випромінювання:**

$$\theta = \lim \frac{dw}{dz} = \frac{2\lambda}{\pi w_0} \quad (4.9)$$

**Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів**  
**4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту**

**А. Для обробки порожнин простої поперечної форми (подовження)**

в). Параметри каустики пучка випромінювання, перетвореного тонкою лінзою (для  $TEM_{00}$ )

1. Розмір перетяжки каустики в лінзі з  $F$ , яка розташована на відстані  $Z = d_0$ :

$$\frac{1}{w_f^2} = \frac{1}{w_0^2} \left( 1 - \frac{d_0}{F} \right)^2 + \frac{4}{(F\theta)^2} \quad (4.10)$$

або за спрощеною залежністю:

$$2w_f = 2 \frac{F\lambda}{\pi w_0}$$

2. Положення горловини каустики відносно лінзи:

$$d_f = F + (d_0 - F) \frac{F^2}{(d_0 - F)^2 + \left( \frac{2w_0}{\theta} \right)^2} \quad (4.11)$$

**Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів**  
**4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту**

**А. Для обробки порожнин простої поперечної форми (подовження)**

3. Розмір перетину каустики пучка випромінювання ( $TEM_{mn}$ ), перетвореного тонкою лінзою, на рівні радіальної інтенсивності  $I_{pz} = I_{p0}/e^2$  (дифракційна межа) при діаметрі лінзи  $D_{лінзи} > 2,8D_{пр}$  ( $D_{пр}$  – діаметр променя на лінзі):

$$2W_{fdифр} = \frac{1,27\lambda A}{D_{л}} \quad (4.12)$$

4. Глибина фокусу ( $2Z_f$ ) в каустиці пучка ( $TEM_{00}$ ), перетвореного лінзою, в межах якого інтенсивність променя на осі зменшується в  $e^2$ :  $I_{pz} = I_{p0}/e^2$

$$Z_f = \pm \frac{4\lambda F^2}{\pi D_{л}^2} \quad (4.13)$$

або за умови збільшення розміру його попереку на:

$$5\%: \quad Z_F = \pm \frac{0,32\pi r_F^2}{\lambda} \quad 10\%: \quad Z_F = \pm \frac{0,46\pi r_0^2}{\lambda}$$



**Тема 4. Технологічні схеми обробки порожнин (отворів, лунок, щілин, пазів) різноманітної форми та розмірів**  
**4.2. Формування та перетворення каустики пучка випромінювання як інструменту**

*А. Для обробки порожнин простої поперечної форми (подовження) .*

**5. Розмір перетину каустики на відстані  $Z_k$  від горловини:**

$$W_k = W_f \left[ 1 + \left( \frac{\lambda Z_k}{\pi W_f^2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (4.14)$$

**6. Для пучків  $TEM_{mn}$  з високим порядком  $m$  і  $n$ , тобто з майже рівномірним розподілом інтенсивності в попереку, в горловині перетвореного пучка інтенсивність розподілиться за законом Ейрі і розмір перетину визначається як діаметр першого дифракційного мінімуму:**

$$2W_{fдифр_{mn}} = 2,44 \frac{\lambda F}{D_\lambda} \quad (4.15)$$

**7. Кут його розбіжності:**

$$\theta_{mn} = 2,44 \frac{\lambda}{W_0} \quad (4.16)$$

**8. Глибина фокусу:**

$$Z_{f_{mn}} = \pm 5,56 \left( \frac{\lambda F^2}{2\pi D_\lambda^2} \right) \quad (4.17)$$