

# Лазерна розмірна обробка

Розділ 1 (подовження)

## Презентація 3

електронний дидактичний демонстраційний матеріал  
супроводження дисципліни

Рекомендовано Методичною радою НТУУ «КПІ»  
(протокол №9 від "21"ТРАВНЯ 2015 р.)

**Автор: проф. Котляров В.П.**

Відповідальний редактор електронного посібника  
доц. Зоренко О.В. (ВПІ НТУУ «КПІ»)

# Розділ 1. Технічне оснащення **технологічної операції (ТО)** **ЛРО (подовження)**

- 1.3. **Форми організації роботи ЛТУ През. №3, сл.№3**
- 1.4. **Устаткування для сучасних форм організації ТО ЛРО През. №3, сл.№14**
- 1.5. **Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ През. №3, сл.№15**

# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

## 1.3.1. Адаптивна організація операцій ЛРО

Враховуючи реальний рівень точності розмірних результатів ЛРО (поле розсіяння діаметральних розмірів досягає 20% від  $d_{НОМ}$ ) можна чекати складність використання поширеного в технології методу роботи “на налагоджених станках” внаслідок перевищення поля розсіяння поля допуску на розміри отворів 12 квалітету та більш точних. Якщо способи та засоби вдосконалення технологічних операцій не дають суттєвого скорочення величини сумарної погрішності операції необхідно обрати інший метод обробки, застосувати додаткову операцію доопрацювання отвору або змінити стратегію основної операції, наприклад, виконуючи “підгонку” його розміру поступовим збільшенням до нижньої межі поля допуску.

Така стратегія виконання технологічної операції називається адаптивною формою її організації і базується на декількох принципах:

- обробку потрібно починати на ЛТУ, яку налагоджено на надання отвору розміру, меншого, ніж найменше допустиме його значення для того, щоб внаслідок значного поля розсіяння він не набув розміру, більшого ніж найбільший допустимий, що привело би до невиправного браку;
- треба організувати вимірювання поточного значення розміру обробляемого елемента заготовки;
- порівняти поточне значення з найменшим допустимим та визначити стратегію змінення рівня налагодження ЛТУ для доопрацювання оброблювального елемента на наступному етапі обробки;

# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

- виконати обробку за обраним режимом до досягнення розміру отвору поля допуску.

В залежності від типу технічного завдання (ТЗ) адаптивна форма організації ТО може змінюватися та набувати інших послідовностей переходів.

## а. Організація операцій для лазерної обробки системи отворів із нормованою сумарною площею їх перетину .

Прикладом такої операції є формування отворів системи охолодження в лопатках турбін (компресорів).

Завдання: Обробити систему отворів, наприклад, в елементах турбін або компресорів для їх охолодження, з *нормованим поточним відхиленням сумарної площі  $N$*  оброблених отворів  $S_{\Sigma N}$  від нормативної  $[S_{\Sigma N}]$ .

Ця задача вирішується *шляхом корекції режиму обробки наступного  $(i + 1)$  отвору* по відношенню до обробленого та виміряного.

### *Порядок виконання технологічної операції:*

- розташувати заготовку в робочій зоні для обробки першого отвору на визначених режимах;
- обробити отвір;
- виміряти показник отвору, за яким контролюється результат операції, наприклад, його діаметральний розмір;
- статистично обробити результати виміру для визначення рівня контрольованого показника, наприклад, *площі перетину отвору*, та його сумарного значення для  $n$  оброблених отворів

$$S_{\Sigma n} = \sum_{i=1}^n S_i$$

- *порівняти* рівень виміряного показника з нормативним його значенням для тієї ж кількості отворів  $[S_{\Sigma n}]$ ;

## 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

• **скоректувати режим обробки наступного отвору** за результатом порівняння виміряного та нормативного показника:

а. режим не змінюється, якщо  $S_{\Sigma n} < [S_{\Sigma n}] \leq It(S_{\Sigma n})$ ;

б. в іншому разі режим **модифікується** для усунення розбіжностей між поточним та нормативним рівнями показника шляхом **змінення рівня** одного або декількох параметрів на крок, що обирається програмно з аналізу **моделі процесу обробки**.

На рис. 1.3.1 показана блок схема ЛТУ, яка працює за наведеним алгоритмом.

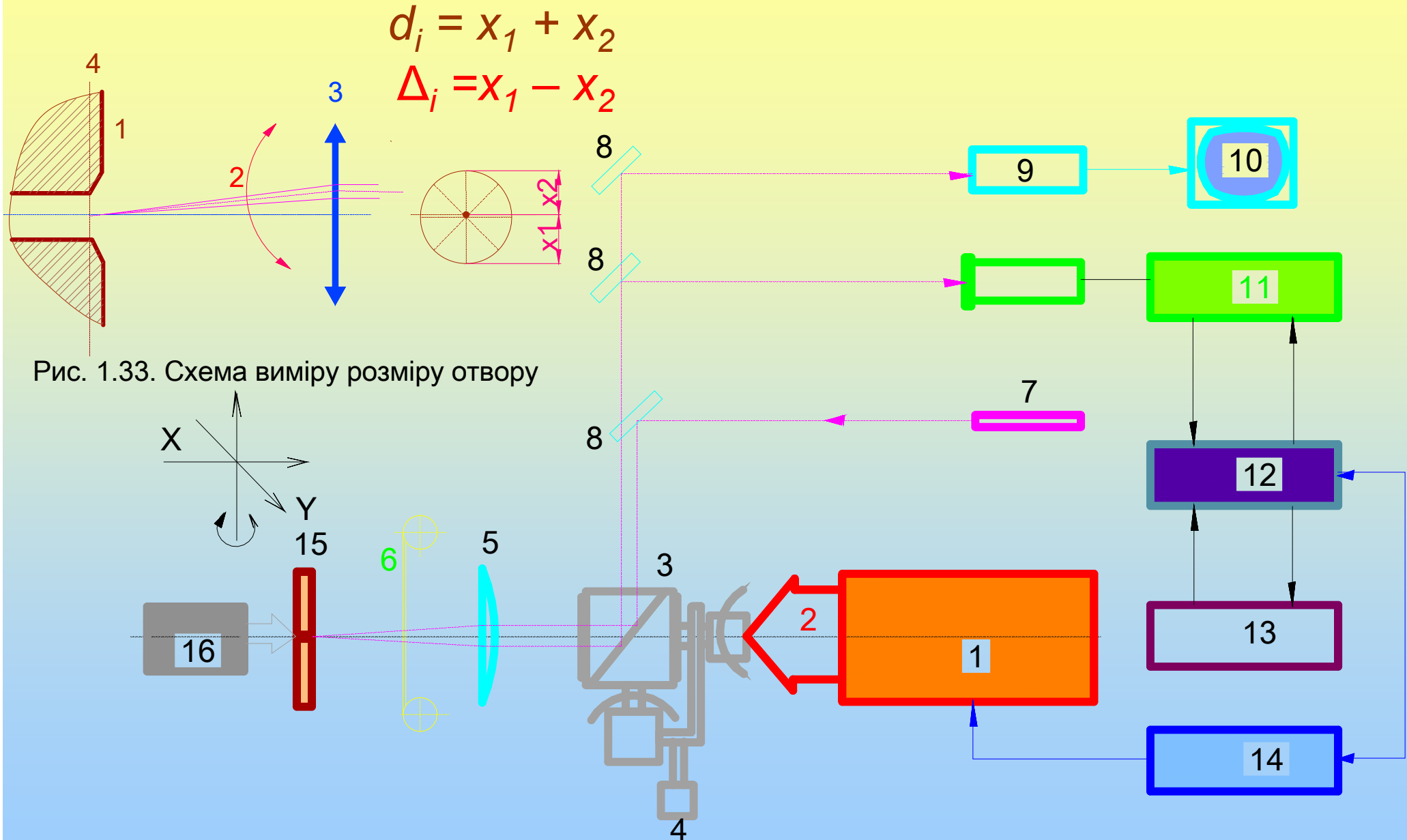
В табл.1.1 наведено витяг із лістингу розмірних результатів обробки 100 отворів та хід впливу на режими обробки за результатами порівняння поточних розмірів та їх похідних і нормативних показників:

• контроль результату виміру трьох перших отворів показав, що відхилення їх сумарної площі від норми знаходиться в межах допущеного  $S_{1-3}$ -  $[S_{1-3}] = 1,67\% < [2,0\%]$ , тому режим обробки наступної трійки не змінено;

• відхилення сумарної площі шести отворів  $S_{1-6}$ - $[S_{1-6}]$  від відповідної норми досягло **-12,3%**, для досягнення допустимої межі змінено режим обробки наступної партії з трьох отворів **зміненням напруги накачування** з 1320В до 1333, така процедура утримана до обробки 100 отворів: корекції режиму відбувалися, зокрема після отворів №№87, 90, 96 та 99;

• обробка отвору №100 на зміненому режимі **виправила сумарну**  $S_{1-100}$ .

# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ



# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

Таблиця 1.1

№ отв.	Діаметр отвору, $\bar{d} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 (x_1 + x_2)_i$ , мкм	Відхилення сумарної площі від нормативу, $\{(S_{\Sigma_n} - [S_{\Sigma_n}]) / [S_{\Sigma_n}]\} 100\%$ (допустима норма $\leq 2\%$ )	Діаметр пучка випромінювання, мм	$U_{\text{нак}}$ , В
1	304	—	14	1320
2	273	—	14	1320
3	283	1,67	14	1320
4	271	—	14	1320
5	282	—	14	1320
6	270	-12,3	14	1320
7	270	—	14	1333
86	289	—	14	1333
87	300	+2,32	14	1333
88	275	—	14	1316
89	287	—	14	1316
90	290	-4,17	14	1316
91	297	—	15	1333
92	306	—	15	1333
93	278	0,61	15	1333
94	299	—	15	1333
95	299	—	15	1333
96	293	+2,76	15	1333
97	281	—	14	1316
98	286	—	14	1316
99	301	-2,4	14	1316
100	286	-1,8	14	1320

# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

## б. Організація операції для обробки системи точних отворів.

Прикладом такої операції є обробка системи отворів в корпусі форсунки дизеля ( $8 \times 0,25 \pm 0,01$  мм).

Завдання: Обробити систему ідентичних отворів, тобто з розміром в межах полю допуску  $It(d) = 0.02$ мм.

Ця задача може вирішитися шляхом корекції режиму обробки **кожного отвору, що обробляється**. Організація операції суттєво відрізняється від попередньої:

### **Порядок виконання технологічної операції:**

- розташувати заготовку в робочій зоні для обробки першого отвору на визначених режимах;
- обробити отвір;
- виміряти показник отвору, за яким контролюється результат операції, наприклад, його розмір  $d_i$ ;
- вимірювальний перехід виконати без переміщення заготовки з робочої позиції під час обробки (активний контроль) або безпосереднє за нею;
- порівняти рівень виміряного показника з межами полю допуску ( $d_{min} \div d_{max}$ );
- скоректувати режим обробки для доопрацювання отвору за результатом порівняння поточного рівня розміру з нормативним:
  - режим не змінюється, якщо  $d_{min} < d_i < d_{max}$ ;
  - режим модифікується з метою приведення поточного показника у межі поля допуску на розмір шляхом зміни рівня одного або декількох параметрів на крок, що обирається програмно з аналізу моделі процесу обробки;
- перехід до нової заготовки або обробка іншого отвору в тій же заготовці.



# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

## Методи та засоби **активного** виміру розміру отвору:

а. з використанням в якості чутливих елементів фотоелектричних датчиків (рис.1.34, 1.35).

За схемою рис.1.34 вимірювання розміру отвору під час обробки виконується залишками енергії променя, що залишилися після формування отвору і засвічує через нього та фільтр 4 фото приймальник 5, за фото струменем якого визначається вимірювачем 6 діаметр отвору. Якщо останній досяг допустимих меж, обробка закінчується його сигналом на блок живлення 7 лазера 1. В другій схемі використовується розширений лінзою 10 промінь додаткового лазера 8, що підвищує точність виміру.

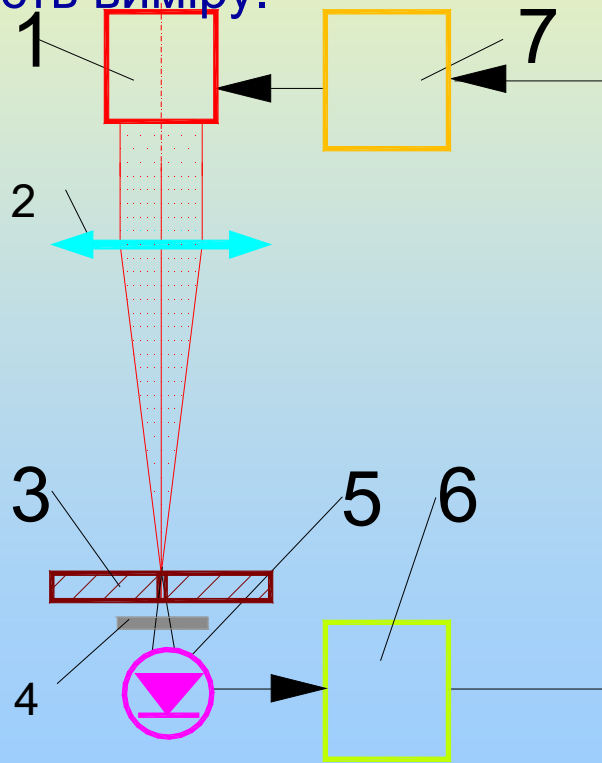


Рис. 1.34.Схема ЛТУ з контролем розміру отвору при його освітленні пучком робочого випромінювання

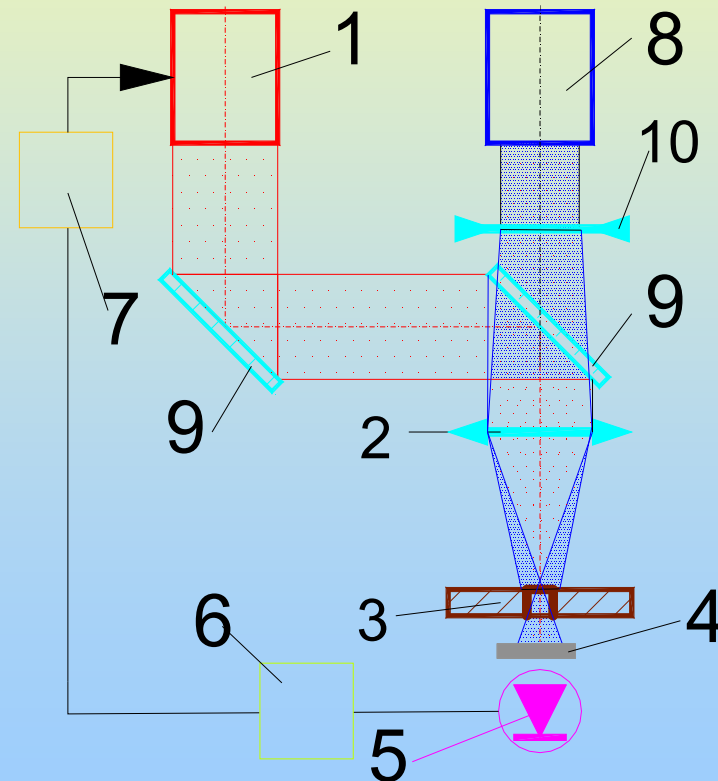


Рис. 1.35.Схема ЛТУ з контролем розміру отвору при освітленні пучком додаткового випромінювання

# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

## Методи та засоби **активного** виміру розміру отвору:

б. з використанням в якості чутливих елементів пневматичних датчиків (рис.1.36, 1.37).

Внаслідок того, що стисле повітря прозоре для лазерного променя зручно використовувати датчики тиску (витрати) для вимірювання отвору під час його обробки. В таких пристроях оброблювальний отвір використовується в якості витратного сопла  $d_i$ , від розміру якого залежить тиск в вимірювальній камері 5, що герметизують із нижньою поверхнею заготовки 3. Якщо дозувати тиск  $p$  та витрати повітря в камеру 5, то тиск в ній буде залежати від діаметру отвору  $d_i$  і при досягненні заданих меж датчик тиску 6 відключить блок живлення 7 лазера 1. В іншій схемі отвір в заготовці 5 доопрацьовують до заданих меж його розміру  $d$  збільшенням розміру інструменту – пучка випромінювання переміщенням лінзи 2 приводом 3 на величину  $\Delta F$ , яка залежить від тиску в камері 7, тобто поточного розміру отвору  $d_i$ . Датчиком 4 регулюється початкове положення лінзи і заготовки.

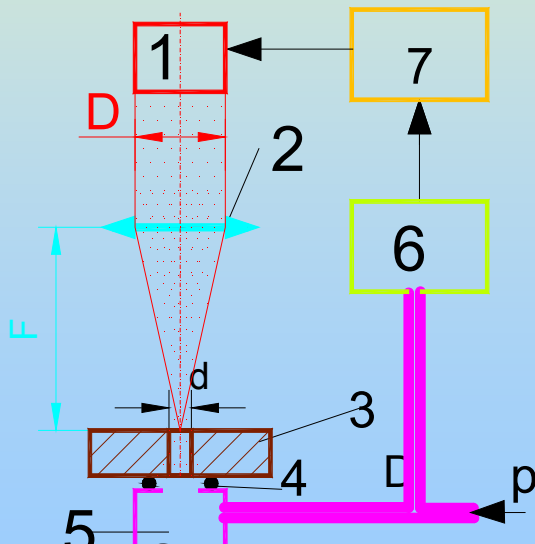


Рис. 1.36. Схеми ЛТУ з активним контролем розміру отвору та із зміною енергетичних параметрів обробки для корегування розміру отвору

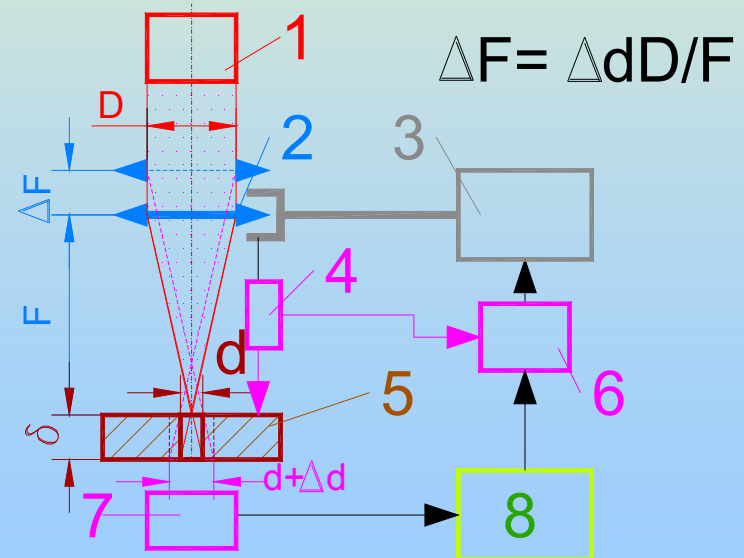


Рис. 1.37. Схеми ЛТУ з активним контролем розміру отвору та з керуванням обробкою змінюючи положення лінзи

# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

## в. Пристрої для обробки точних отворів в адаптивному режимі (рис.1.38 – 1.40)

Обробка отворів в заготовках простої об'ємної форми (диск, циліндр, куля тощо), які мають один отвір з автоматизацією досягнення їх діаметрів заданого розміру може виконуватися на ЛТУ, схема якої зображена на рис.1.38 [13]. Заготовка 3 (диск) розташовується в отворі столу 9 на ущільненні 7. Знизу вона опирається на пружину 6, а зверху на заготовку тисне пружина 5, зусилля якої та положення заготовки 3 визначається різьбовою кришкою 4, що встановлюється на столі 9. Порожнина столу 9 зі сторони пружини 6 має отвір для підключення до повітряної магістралі з вхідною діафрагмою 11 діаметром  $d_{ex}$ , до якої також підключено датчик тиску 8, що керує роботою блоку живлення 10 лазера 1. Жорсткість пружин 5 та 6 і тиск повітря  $p$  обирають такими, щоб заготовка прийняла положення відповідно до режиму обробки (в прикладі –  $F$ ) та балансу сил:  $p_i S + F_6 + F_7 = F_5$ . Перші імпульси випромінювання виконують обробку до формування наскрізного каналу отвору  $d_i < [d]$ . Баланс сил порушується внаслідок падіння тиску  $p_i$  в вимірювальній камері столу 9, що викликає зміщення заготовки під дією пружини 5 вздовж каустики променя в сторону її більших розмірів:  $d+\Delta d$ , де  $\Delta d = \Delta F t g \gamma$ , де:  $\Delta F$  – величина зміщення заготовки 3,  $\gamma$  – півкуту світлового конусу  $arctg D/2F$ . Це триває до поступового наближення діаметру отвору до  $[d]$ . Крок прирощення діаметру отвору залежить від пневматичної характеристики вимірювальної системи.

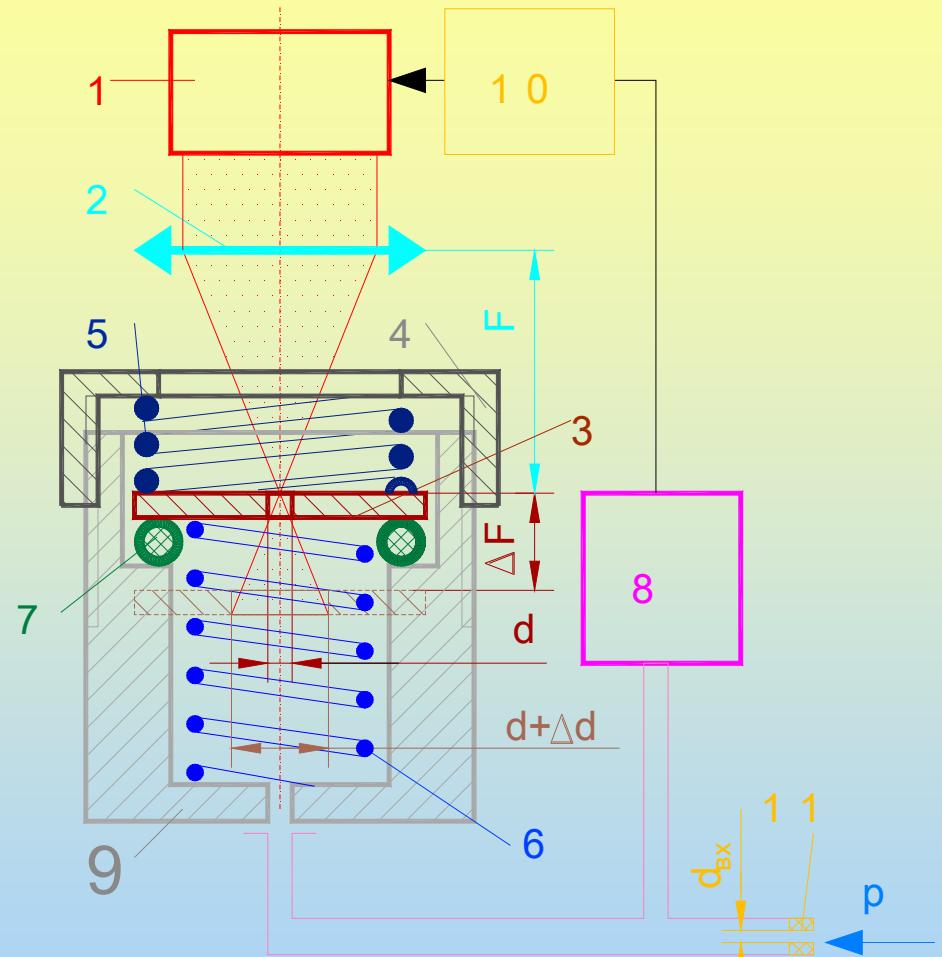


Рис.1.38. Схема ЛТУ для обробки отворів в заготовках простої форми з одним отвором

# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

Тиск в камері 9 залежить від розміру отвору  $d_i$ , вхідної діафрагми 11  $d_{ex}$  та початкового рівня тиску  $p_i$  (рис.1.39):

- збільшення тиску підвищує крутість характеристики (криві 1 та 3);

- при збільшенні розміру  $d_{ex}$  характеристика стає пологіша (криві 2 та 1).

На рис.1.40 показано динаміку росту отвору в заготовках різних товщин.

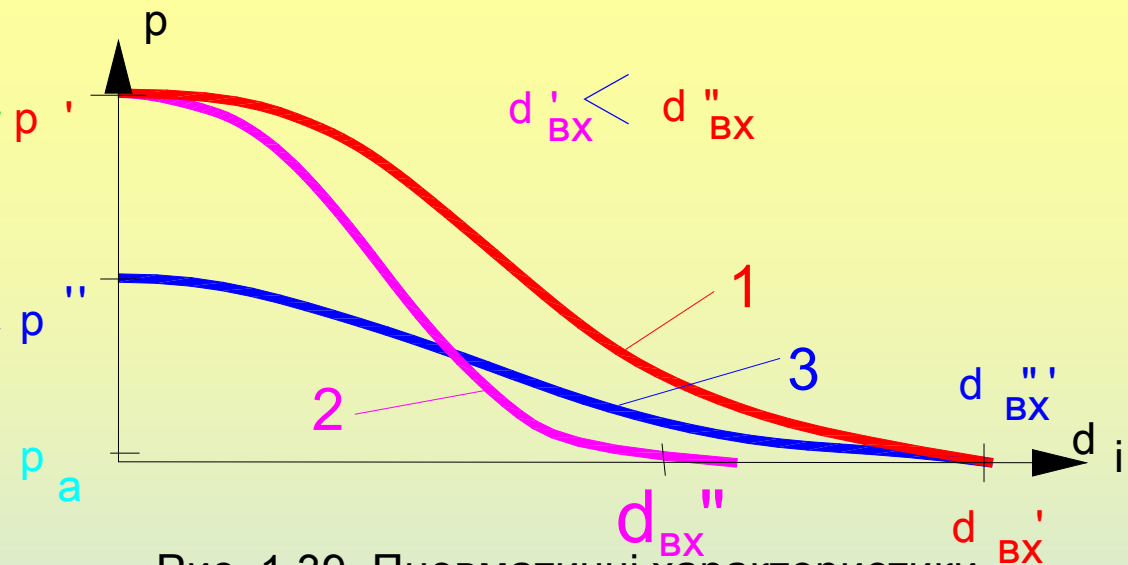


Рис. 1.39. Пневматичні характеристики вимірювальної пневматичної системи

Використання адаптивної форми організації операції дозволяє підвищити точність отворів у партії заготовок (рис.1.41)

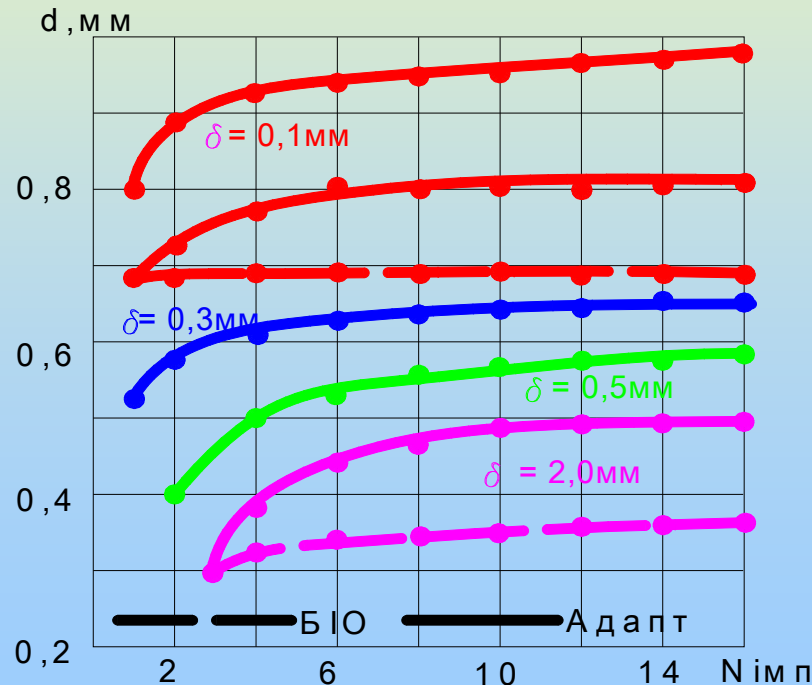


Рис. 1.40. Характер зміни розміру порожнини в заготовках різної товщини при обробці БІО та при адаптивній організації операції

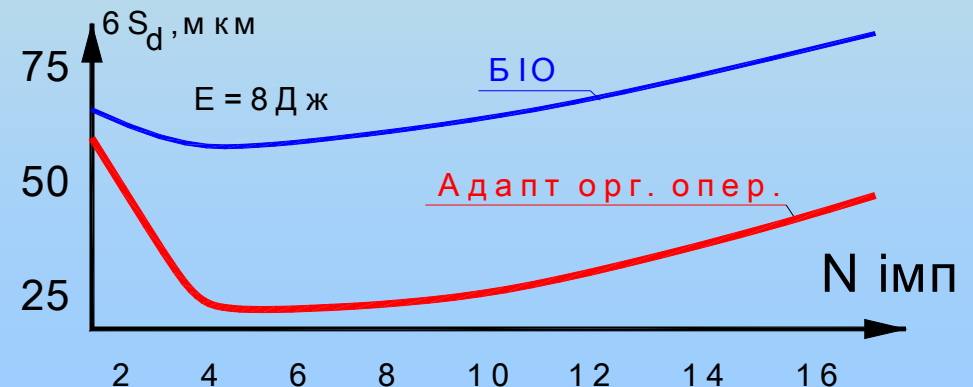


Рис. 1.41. Порівняльні характеристики точності оброблених отворів в операціях БІО та з адаптивною організацією

# 1.3. Форми організації роботи ЛТУ

Для використання принципів організації операції в попередній схемі ЛТУ, але для більш складних технологічних випадків пропонуються такі схеми ЛТУ:

- для заготовок призвільної форми, але з одним отвором (рис.1.42а) налагоджувальне переміщення каустики променя відносно заготовки 3 виконує лінза 2, яку закріплено до штоку 12 пневмоциліндра односторонньої дії 9. Вимірвальна камера створена під заготовкою 3 і включає в себе робочу порожнину циліндра 9 та датчик тиску 8, підключений до БЖ 10 лазера 1.
- для листових заготовок 3 (рис.1.42б) в якості поршня пневмоциліндру 9 використано лінзу в оправі 2, а вимірвальна камера розташована під нею з соплом 13 для обдування отвору, що обробляється. Падіння тиску в ній дозволяє пружині 5 зміщувати лінзу (каустику) вглиб заготовки доробляючи отвір.

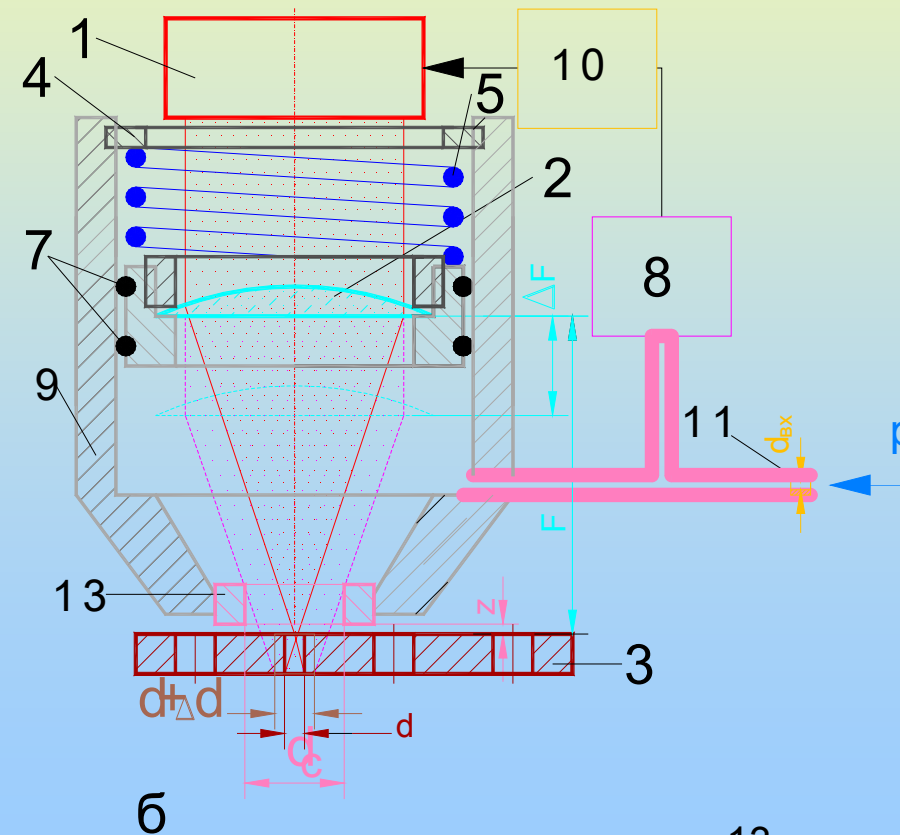
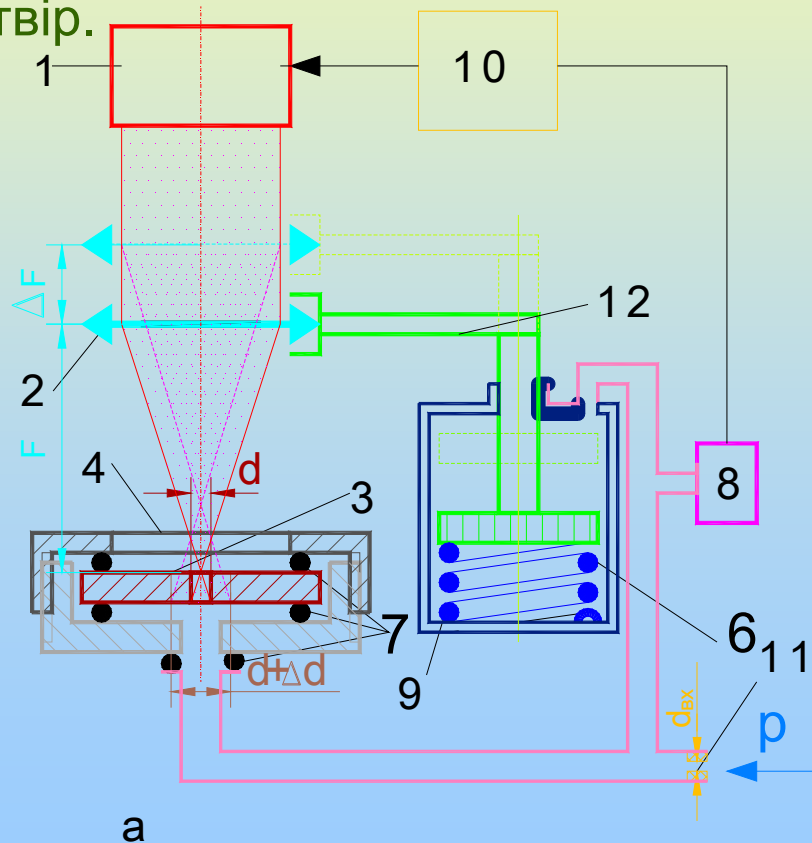


Рис .1.42. Схеми ЛТУ з активним контролем розміру отворів та керуванням процесом обробки зміною розміру пучка випромінювання

# 1.4. Устаткування для сучасних форм організації ТО

## ПРО

**Основні напрямки сучасної організації технологічних операцій:**

- роботизація технологічних операцій;
- процесорне керування операцією та її переходами.

**Об'єднання лазерної технології та робототехніки дозволяє:**

- ✓підвищувати концентрацію операцій на одному робочому місці без використання оброблювальних центрів завдячуючи гнучкості лазерної технології;
- ✓створювати “безлюдні” технології, результати яких більш очікувані внаслідок усунення діяння суб'єктивних факторів;
- ✓використовувати принцип дії Гнучких Виробничих Систем (ГВС), що дозволяє досягти високої ступені механізації, автоматизації та продуктивності обробки і для операцій дрібносерійного виробництва.

**Особливості роботизації операцій лазерної технології** зв'язані з полегшенням транспортування інструменту відносно заготовки шляхом використання антропоморфних роботів та волоконних світловодів; можливістю оперативної зміни енергонасиченості операції в результаті використання розділення на складові та поєднання декількох пучків з різними хвильовими характеристиками від декількох випромінювачів, розташованих за межами робочої зони (технологічного модуля).

**Використання гнучкості лазерного інструменту** дозволяє за обмеженою кількістю лазерів (частіше одного) використовувати його промінь для таких операцій:

- ❖розмірної обробки (свердління, контурне вирізання, мікрофрезерування, гравірування поверхні);
- ❖зміцнення металевого інструменту і оброблювальної заготовки (загартування, легування, наплавлення, аморфізація, тощо) без необхідності транспортування в інші цехи;
- ❖зварювання деталей із різнорідних матеріалів в конструкції з дозованим вводом енергії в зону обробки;
- ❖зачистка задирок, розмітка, формування регулярного мікрорельєфу;
- ❖контроль стану механічного інструменту, його розмірних та якісних характеристик, розмірів оброблювальної заготовки, взаємного їх переміщення, тощо.



# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

## 1. ЛТУ для розмірної обробки елементів виробів із металу

Особливістю ЛТУ такого призначення є:

- використання випромінювача з коротко хвильовим променем (інфрачервоні ближньої області: дискові, на кристалах  $YAG: Nd^{+3}$ ; волоконні  $Yb^{+3}$ ; видимого діапазону  $Al_2O_3: Cr^{+3}$ ;  $Cu$ ; ультрафіолетові:  $N_2$ ; ексимерні  $F_2$ ,  $ArF$ ,  $KrCl$ ,  $K_2F$ );
- режим роботи може бути імпульсним за рахунок відповідного режиму накачування або безперервним, але з можливістю переключення в імпульсний режим вбудованим пристроєм, чи з конструктивною можливістю застосування додаткового модулятора;
- технологічний модуль повинен надавати можливість розташування заготовок умовленого асортименту (за розмірами, зокрема, висотою; за формою, зокрема, об'ємні) або настановочних елементів, пристроїв для закріплення заготовки з механізованим притиском) та позиціонувати її відносно лазерного променя або координатно зміщувати;
- оптична система має бути пристосованою для використання обраних за розрахунком елементів (лінз, об'єктивів, трансфокаторів або сканерів) та утримувати пристрої для корекції параметрів променя для компенсації змінних умов опромінювання;
- для особливих умов обробки повинна бути можливість подання в зону обробки стислого повітря або газів для технологічних потреб (інтенсифікацію видалення руйнованого матеріалу заготовки, створення контрольованої атмосфери, енергопостачання для механізмів з пневмо приводом та для захисту та охолодження елементів оптичної системи);
- робоча зона модуля або зона обробки має бути доступна для її вакуумування або очищення шляхом вентиляції.

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

## 2. ЛТУ для розмірної обробки елементів конструкцій виробів із неметалів

Особливістю ЛТУ такого призначення є:

- переважальне використання випромінювачів з довго хвильовим променем (інфрачервоні дальньої області:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$  - лазери; видимого діапазону  $\text{Cu}$ ; ультрафіолетові:  $\text{N}_2$ ; ексимерні  $\text{F}_2$ ,  $\text{ArF}$ ,  $\text{KrCl}$ ,  $\text{K}_2\text{F}$ ,  $\text{XeCl}$ , та  $\text{XeF}$ );
- режим роботи може бути імпульсним за рахунок відповідного режиму накачування або безперервним для деяких видів технологічних операцій;
- для особливих умов обробки (заготівки із горючих матеріалів) повинна бути можливість подання в зону обробки інертного ( $\text{Ar}$ ,  $\text{He}$ ) або неактивного газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ) з метою запобігання загорання заготівки чи продуктів її руйнування, або їх нормована суміш для інтенсифікації операцій обробки [15];
- продукти руйнування, видалені із зони обробки, повинні очищуватися перед викидом до атмосфери;
- інші вимоги не відрізняються від вимог для обробки металевих заготовок.

## 3. Оптична схема ЛТУ для розмірної обробки (рис.1.43)

- для лазерного формування розмірних елементів в нежорстких листових заготівках (контурним їх вирізанням) товщиною до 5 мм використано лазер з двома квантронами з безперервним режимом накачування (3 – 5);
- для обробки отворів та гравірування на поверхні необхідна її модернізації, для чого передбачено модулятор 3 для формування імпульсного режиму [16]; модернізована оптична система СОК-1м з механізмом її налагодження відносно заготівки за методом подвійного зображення; трансфокатор на похилій лінзи 10 [17] (рис.1.47); різак для газолазерного вирізання з механізмом 13–14 підтримання початкових умов опромінення протягом операції. На рис.1.44 наведено загальний вид ГПЛТ250 з пристроями модернізації, а на рис. 1.45 – 1.49 їх конструкції.



# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

## Оптична схема ЛТУ

для лазерного розсіювання та розсіяного світла

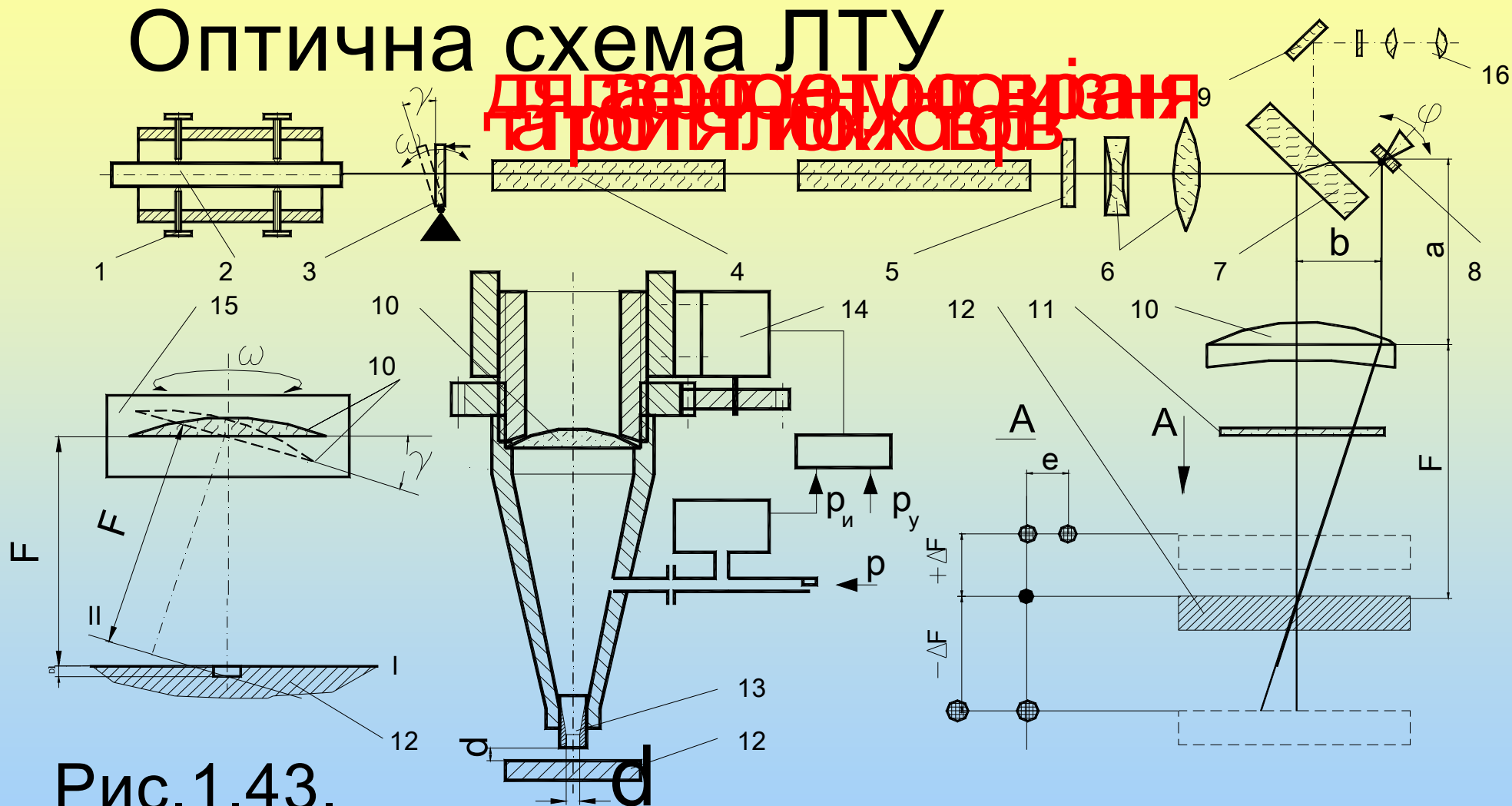


Рис. 1.43.

$$\gamma = \arccos \frac{1}{\frac{\Delta l}{F} + 1}$$

$$\varphi = \frac{1}{2} \arctg \frac{a}{\left\{ (F-b) \Delta \frac{F-F}{2} \right\}}$$

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

До конструкції ЛТУ додано:

- сканер 59 (рис.1.48) для вирізання круглих отворів діаметром  $>0,5$  мм [18];
- оптична система 67, яка замінює СОК-1 при використанні  $CO_2$  лазера;
- в СОК-1 похиле дзеркало замінено на його мозаїчну конструкцію (рис.1.46) для оперативного нанесення написів [19];
- додатковий лазер ( $He-Ne$ ) в юстировочному вузлі 60 для юстирування лазера та центрування СОК-1 або лазер  $Al_xGa_{1-x}As$  68 з  $\lambda = 0,62$ мкм.

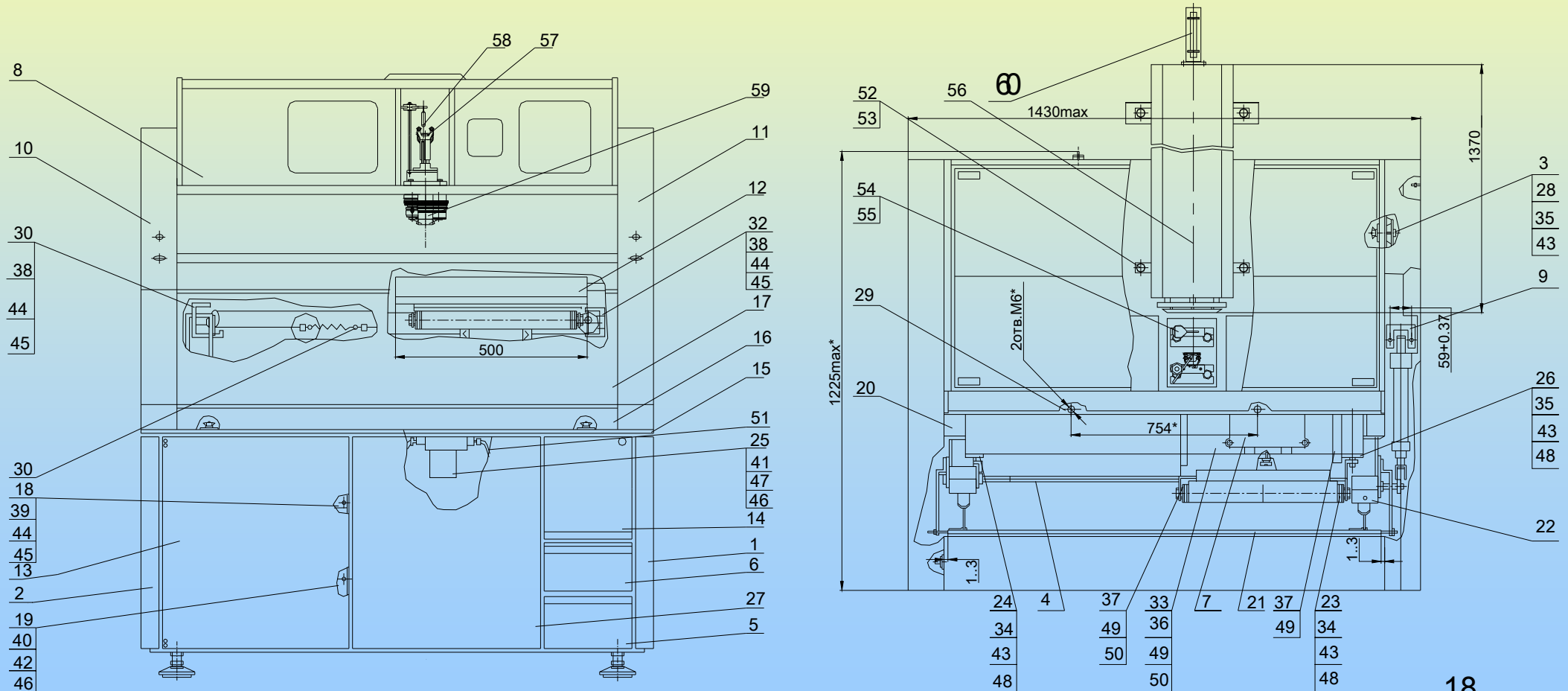


Рис.1.44.ЛТУ ГПЛТ250 з елементами її модернізації для операцій ЛРО

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

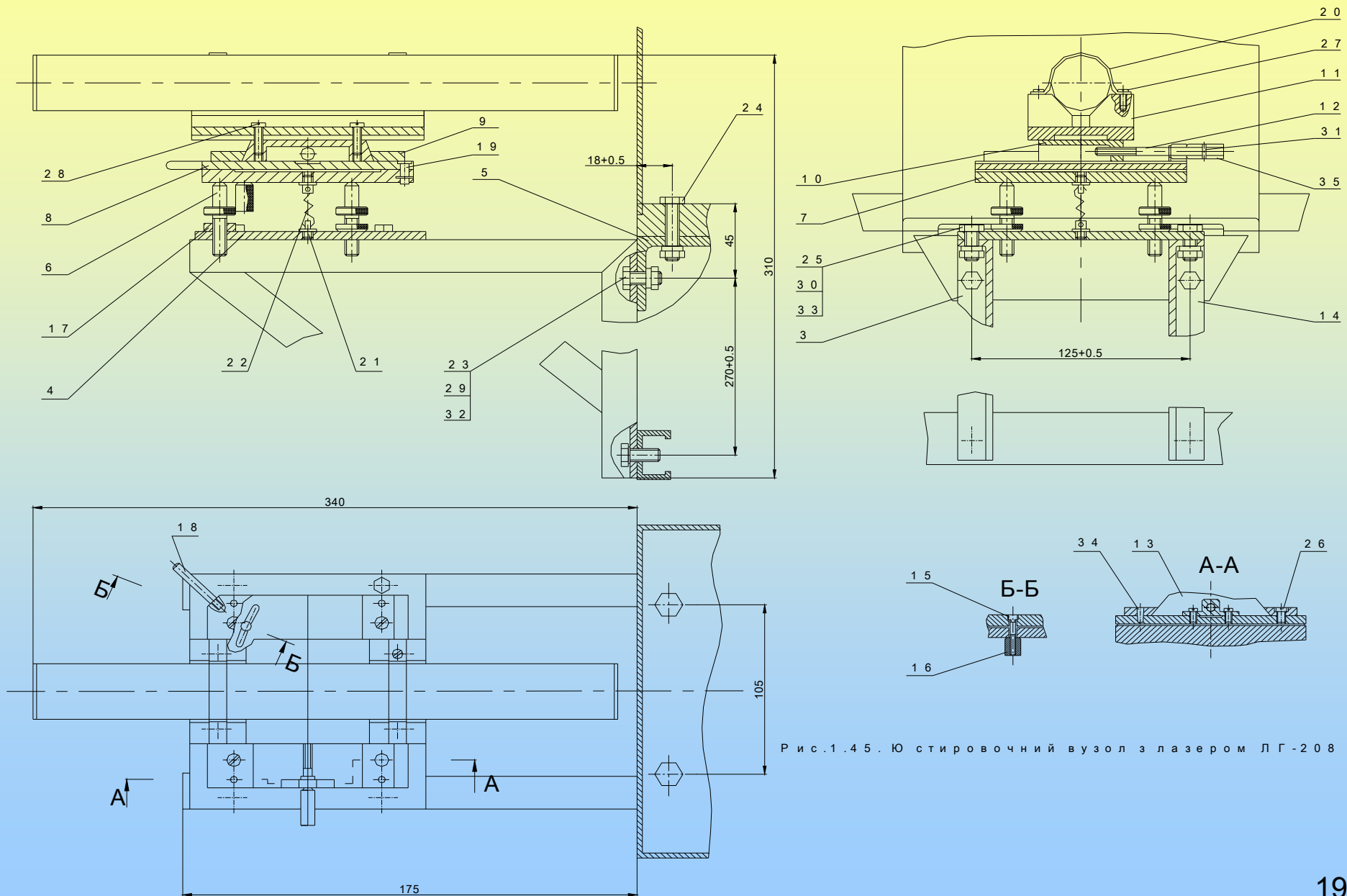


Рис.1.45. Ю стировочний вузол з лазером ЛГ-208

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

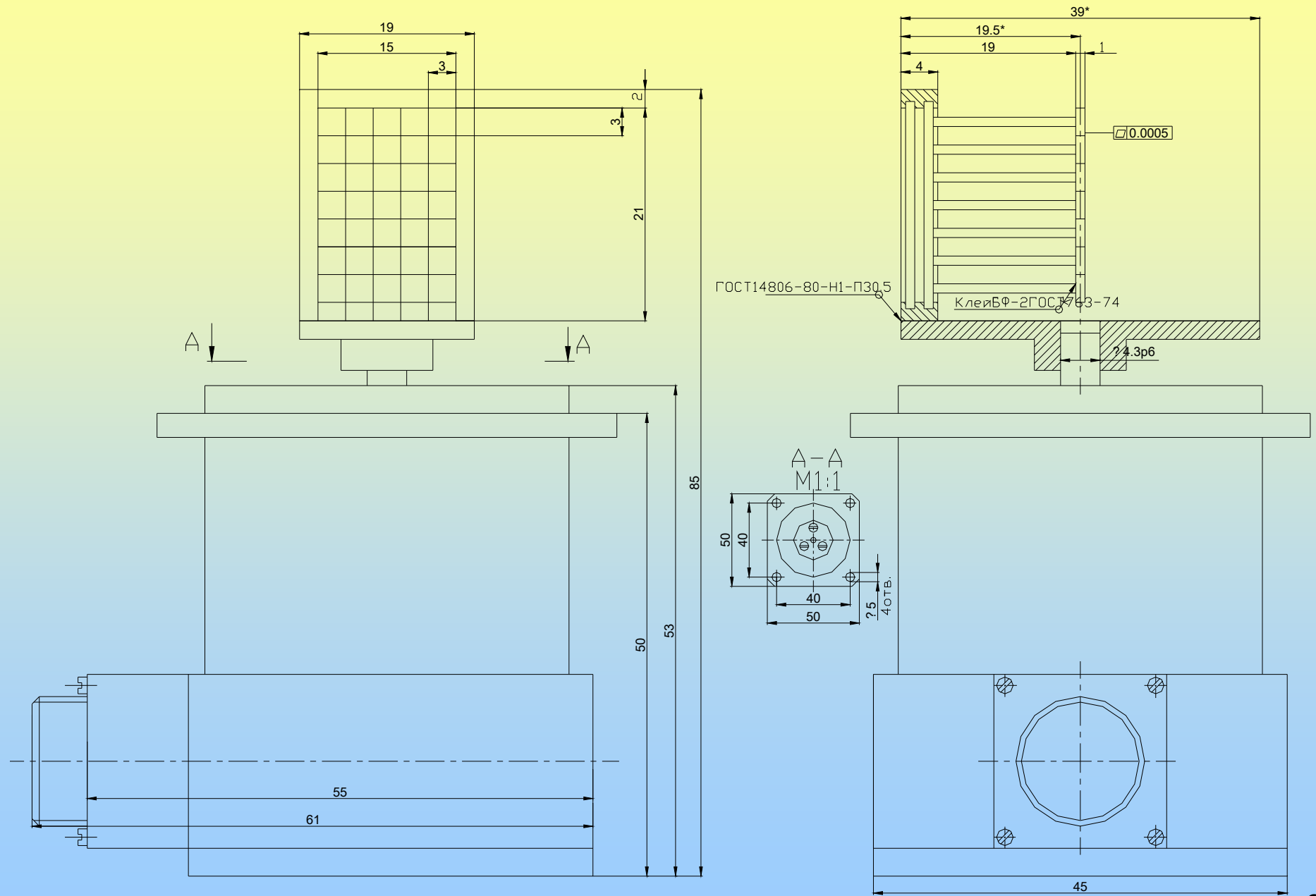


Рис.1.46.Похиле дзеркало СОК-1 з мозаїчною дзеркальною поверхнею

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

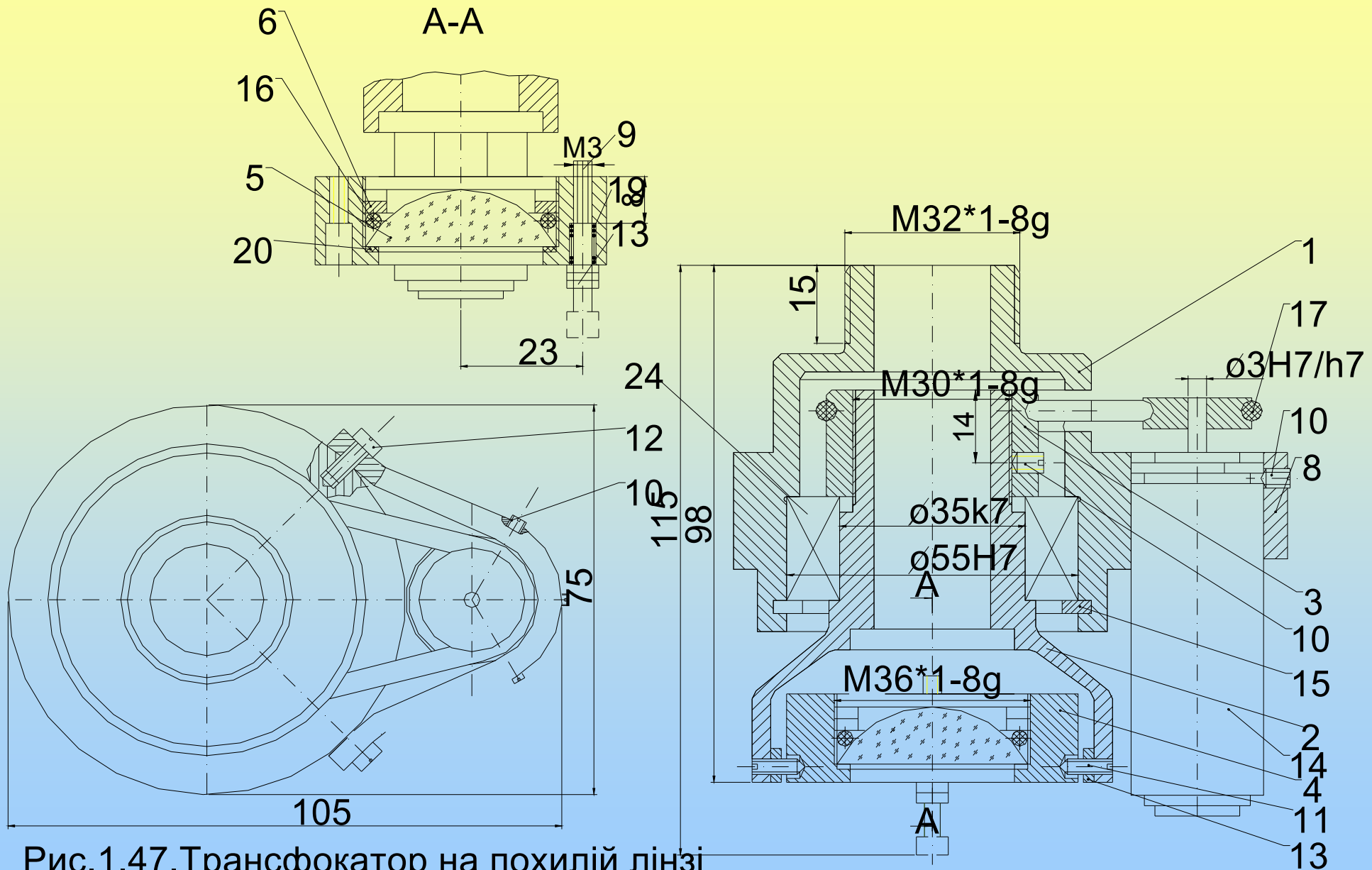


Рис.1.47. Трансформатор на похилій лінзі

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

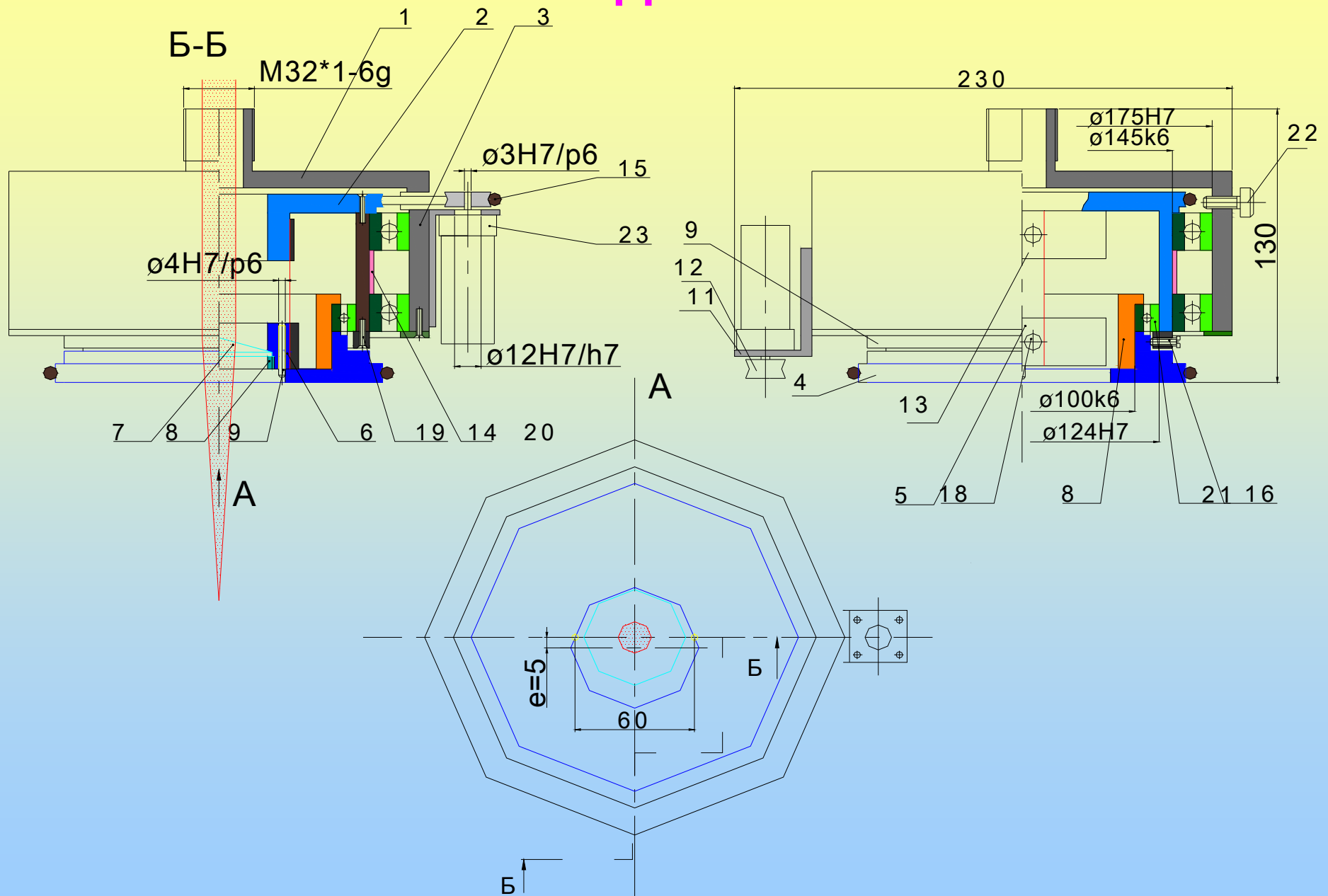


Рис.1.48.Сканер на пружинах

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

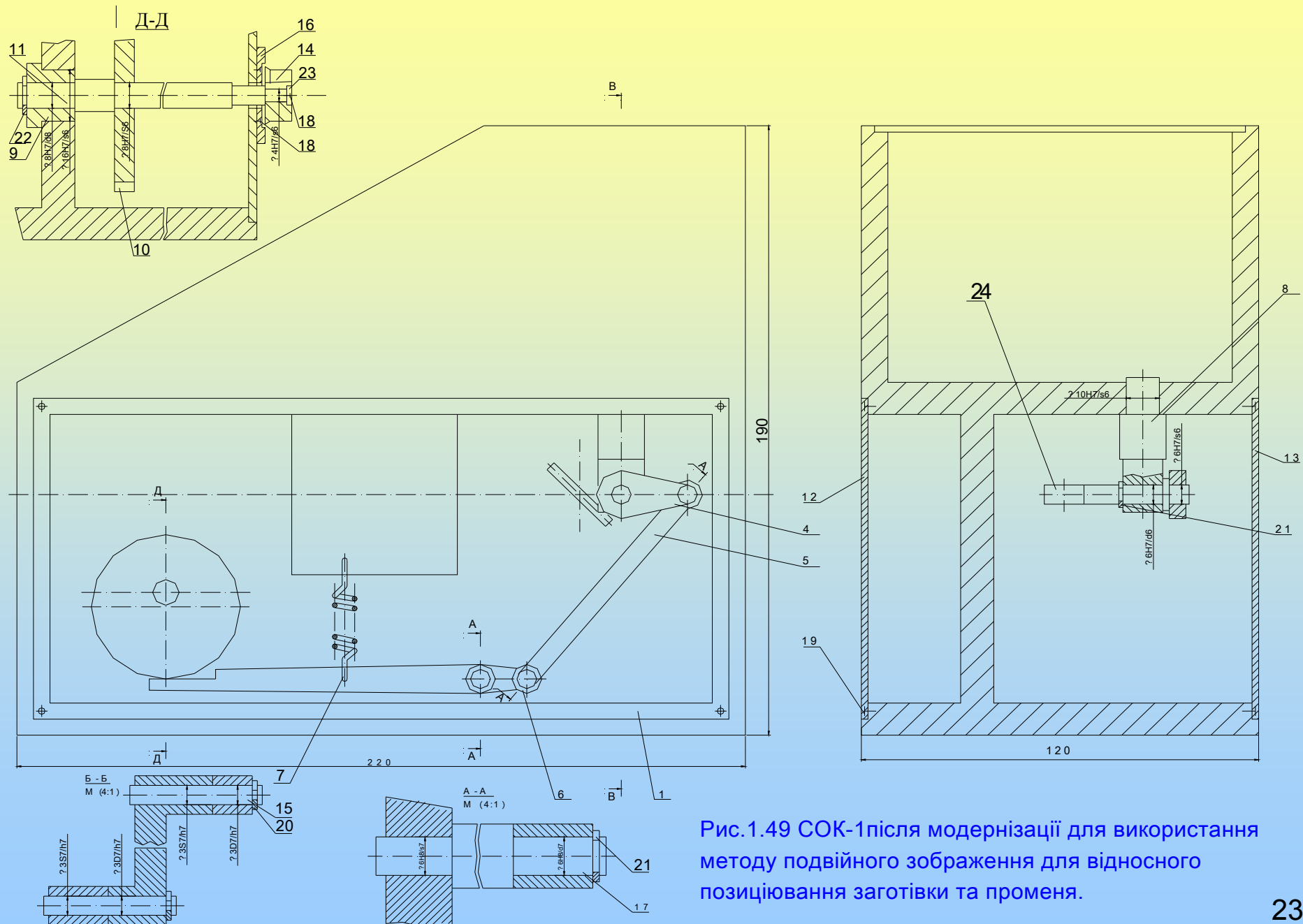


Рис.1.49 СОК-1 після модернізації для використання методу подвійного зображення для відносного позиювання заготовки та променя.

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

## Оптична схема ЛТУ для обробки неметалів

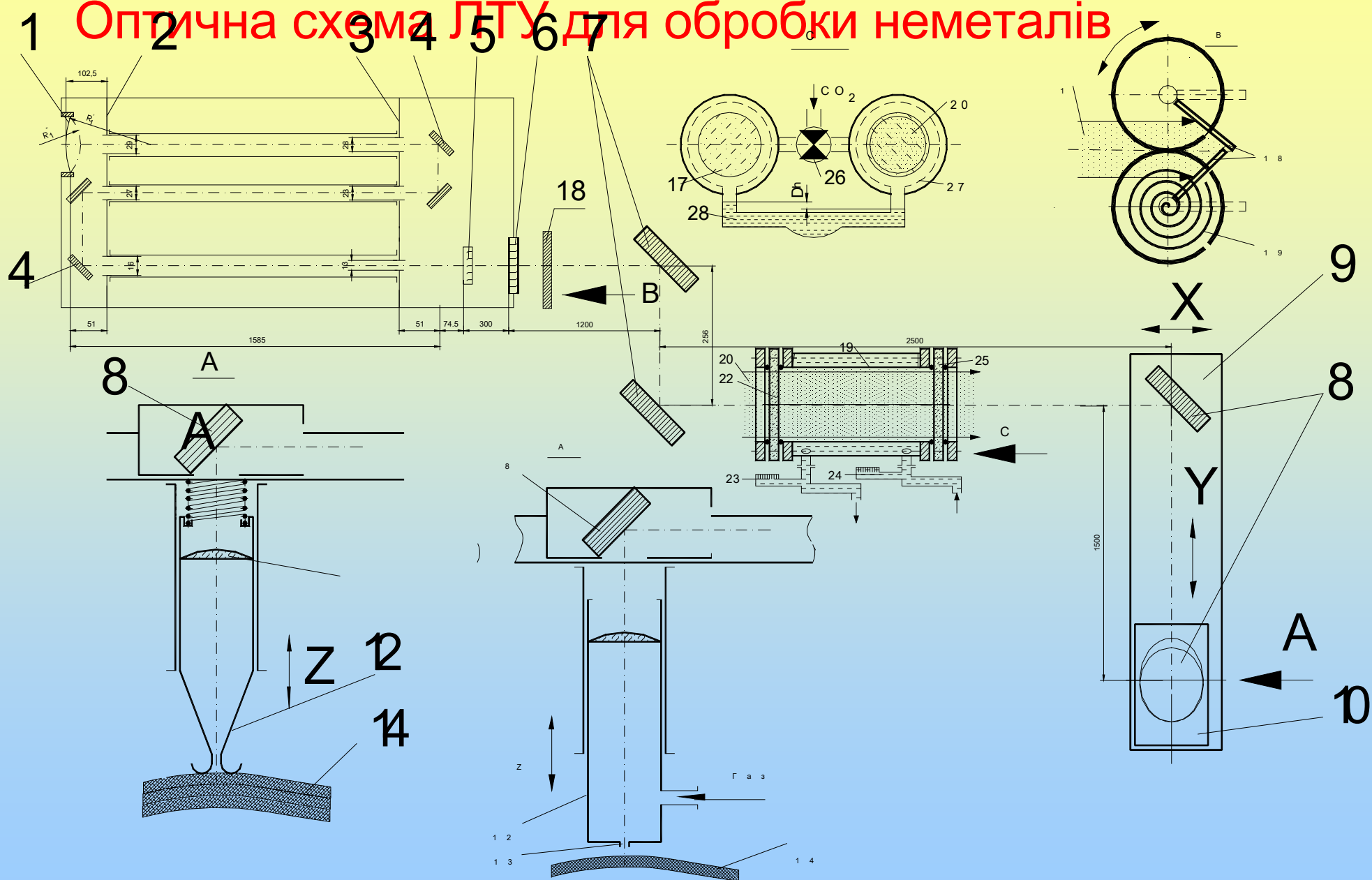


Рис.1.50. ЛТУ з лазером "Іскар"



# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

- для формування розмірних елементів (отвори, лунки, пази, різи, поверхневі малюнки як системи елементів) в **заготівках із неметалів**, таких як скло, кварц, слюда, які прозорі для видимого діапазону світла, доводиться вирішувати задачу **забезпечення поглинання променевої енергії** поверхнею заготовки або одним з відомих способів її покриття або узгодженням довжини хвилі із властивостями матеріалу. Із відомих та промислових типів лазерів найбільш поширений лазер на  $CO_2$  ( $\lambda = 10,6$  мкм). Однак, більшість з них працює у безперервному режимі в діапазоні потужностей  $P \in 30 \div 100$  Вт, що недостатньо для формування розмірних елементів в заготівках завтовшки більше 10 мм, а використання потужніших лазерів з поперечним накачуванням або із швидкісним повздовжнім при потужностях  $> 1,0$  кВт неефективно. Найбільш вдалим рішенням є **використання лазера з повздовжнім накачуванням "Іскар"** та безперервним режимом роботи. На рис.1.50 наведено **оптичну схему ЛТУ на такому лазері**, але з відповідною модернізацією:

- для оперативного переходу до імпульсного режиму (операції врізання для контурної обробки, виготовлення отворів, розкрою тонких заготовок та поверхневого гравірування) використана конструкція модулятора (рис.1.52) для резонаторів із сферичними дзеркалами [20];

- прохідна конструкція вимірювача потужності променя [21],

- заслінка (аварійна або технологічна) для створення перерв в операції без вимикання лазера (рис.1.53),

- різак для контурного вирізання виробів або отворів з керуємим нахилом крайок (рис.1.54) [22]. Також потребується рішення стабілізації умов опромінення під час розрізання тонких нежорстких листів бажано в без контактному режимі, наприклад, з використанням механічного контролю (рис.1.55) положення різака відносно поверхні заготовки [23]. На рис.1.51 зображено конструкцію ЛТУ з лазером "Іскар" та технологічним модулем порталного типу на аеростатичних опорах та з лінійними двигунами.

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

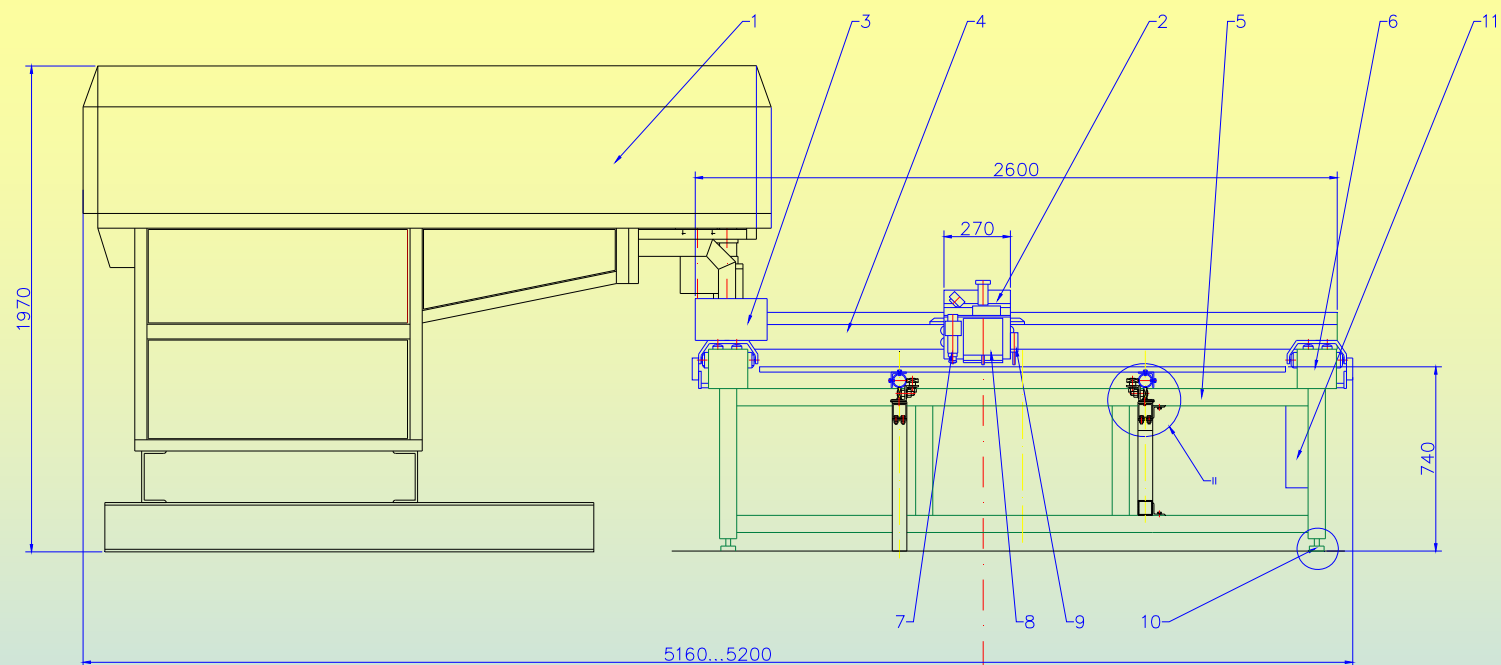
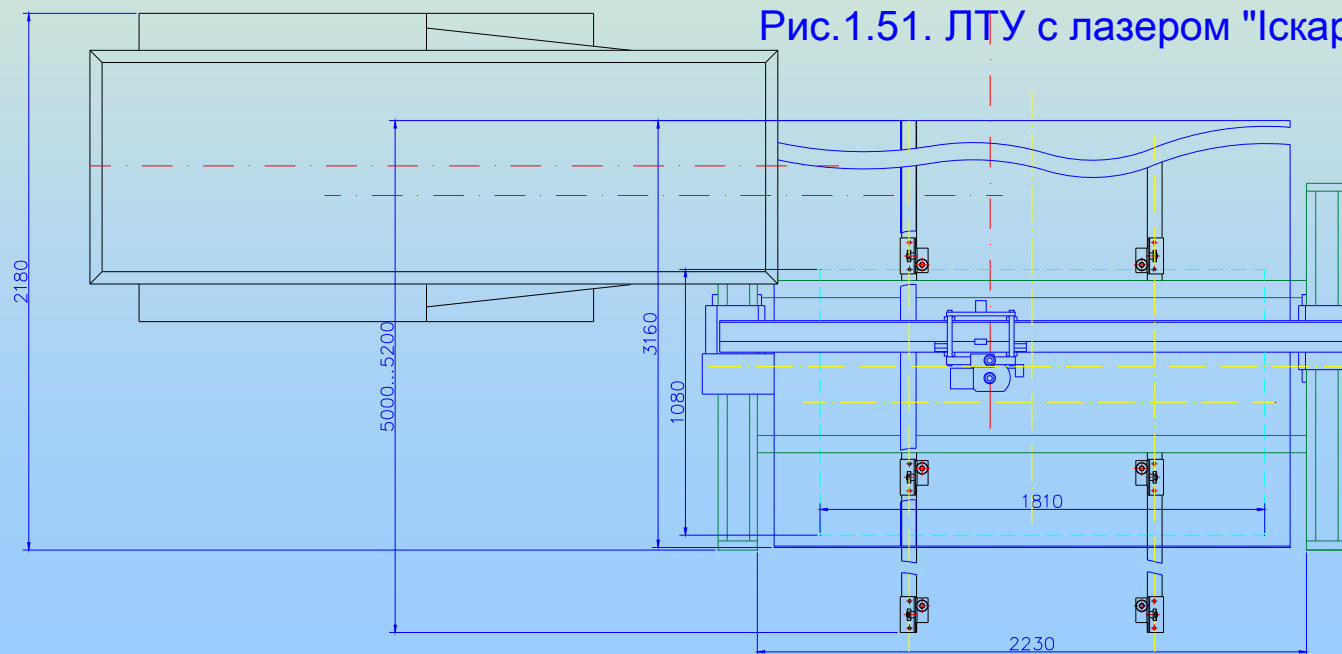


Рис.1.51. ЛТУ с лазером "Искар"



# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

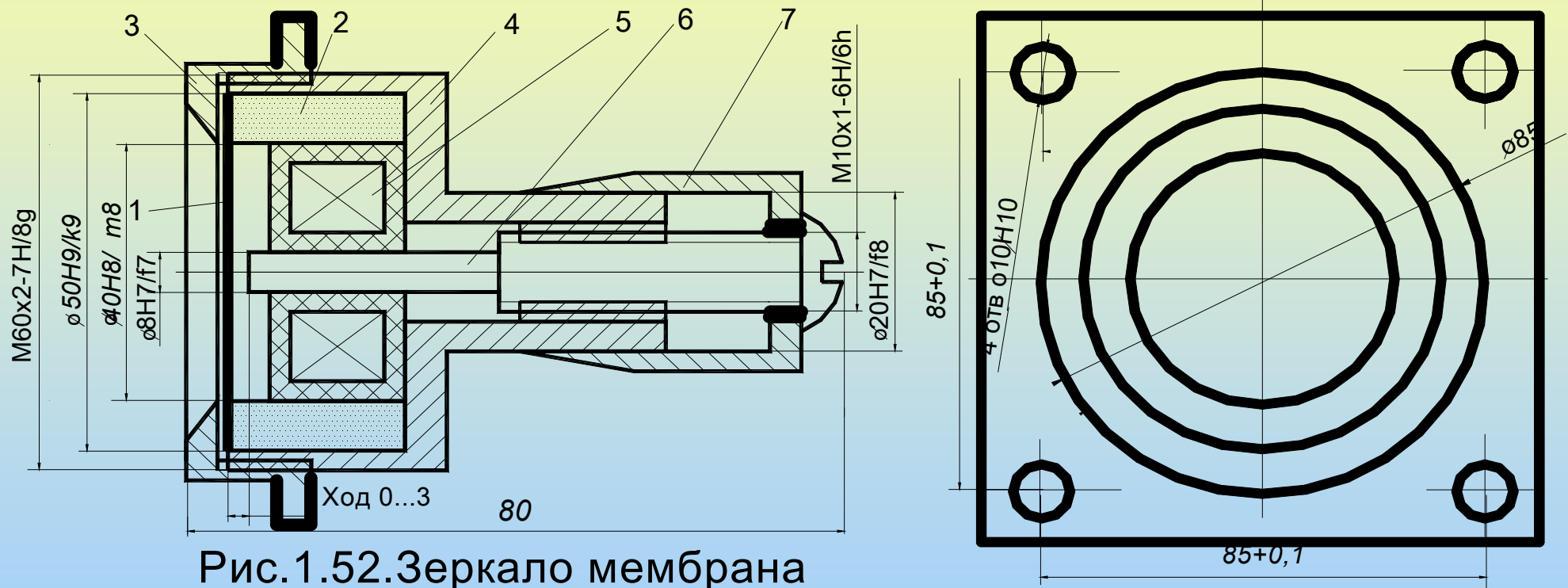


Рис.1.52.Зеркало мембрана

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

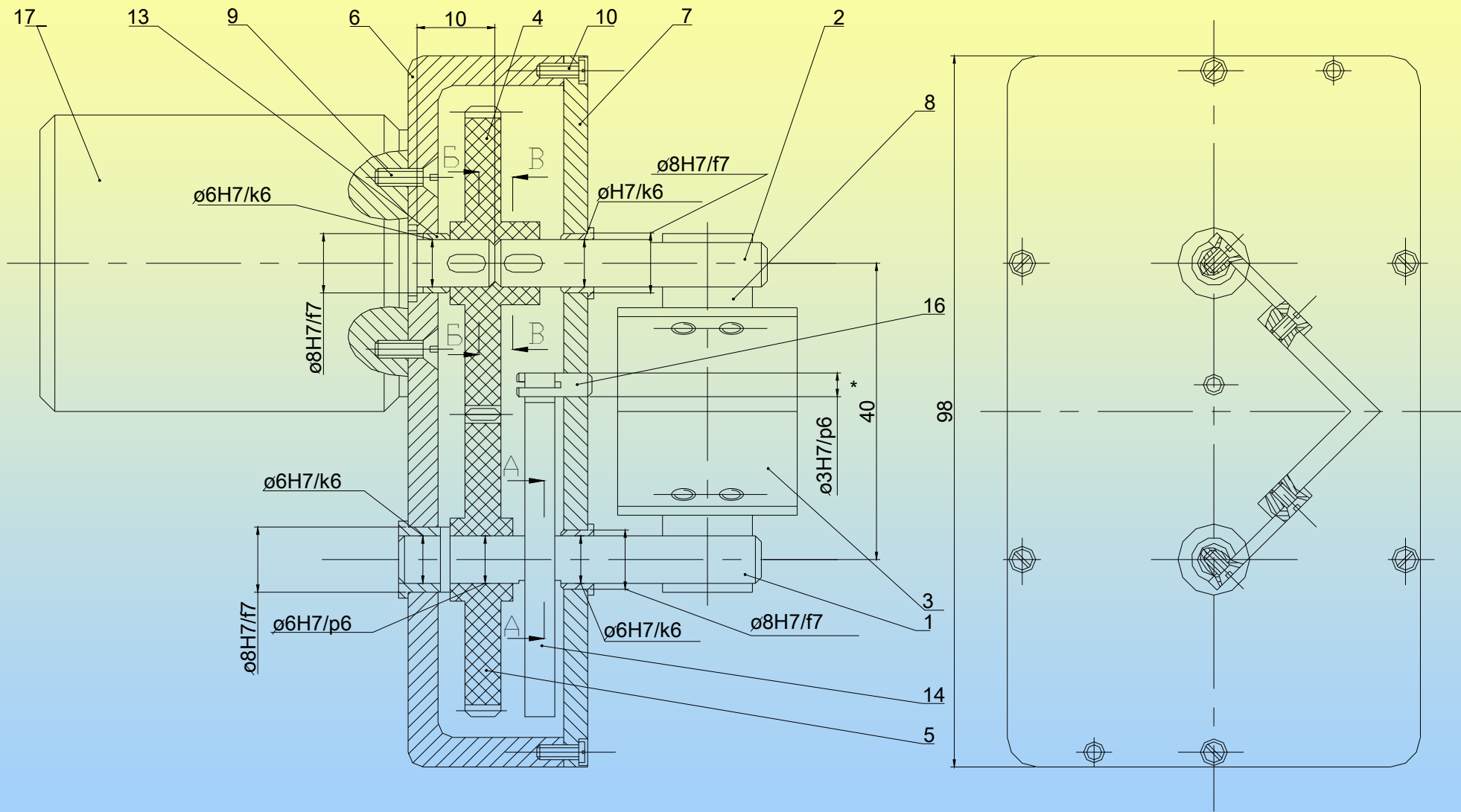


Рис.1.53. Заслінка для лазера "Іскар"

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

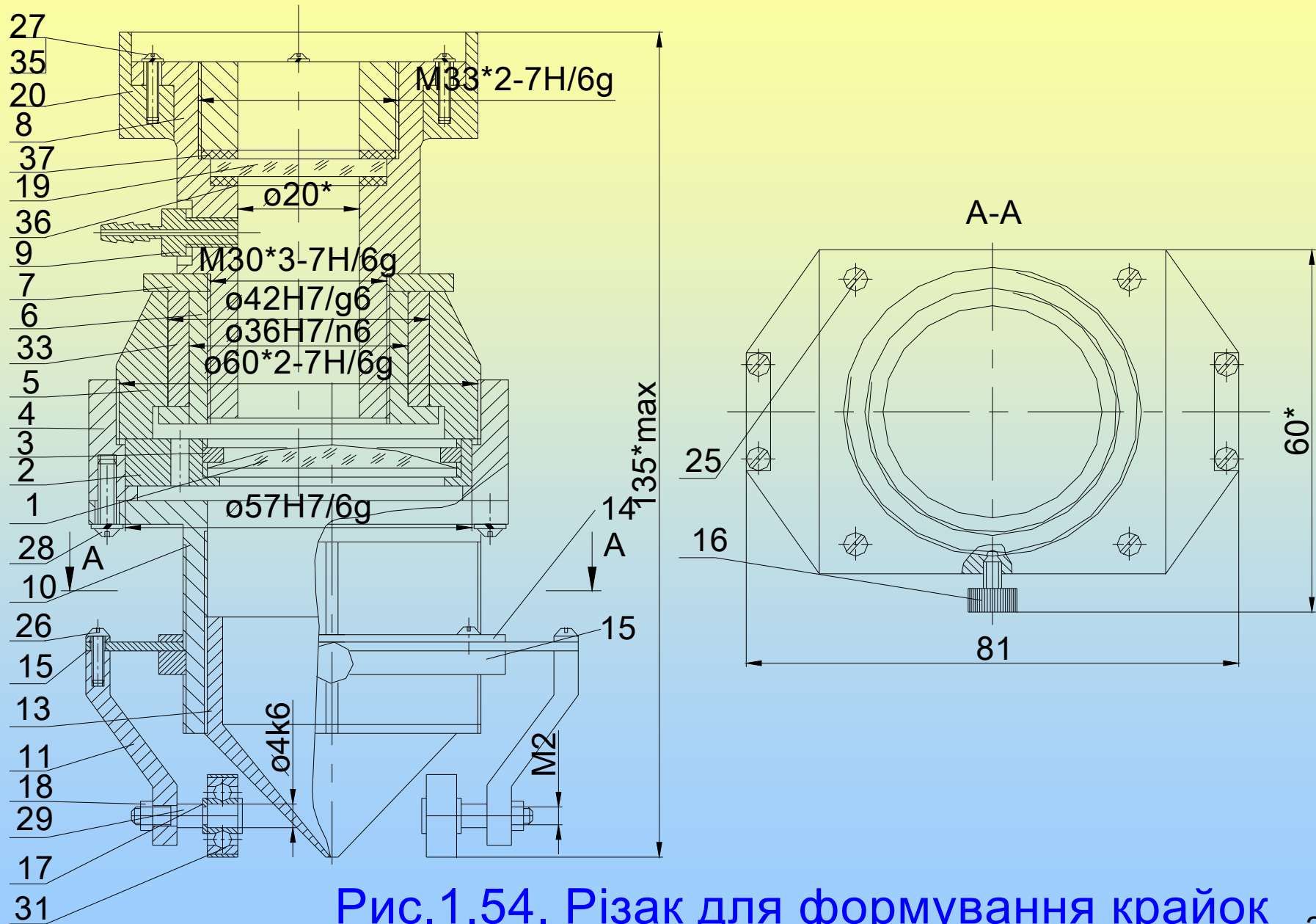


Рис.1.54. Різак для формування крайок

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

Б (4:1)

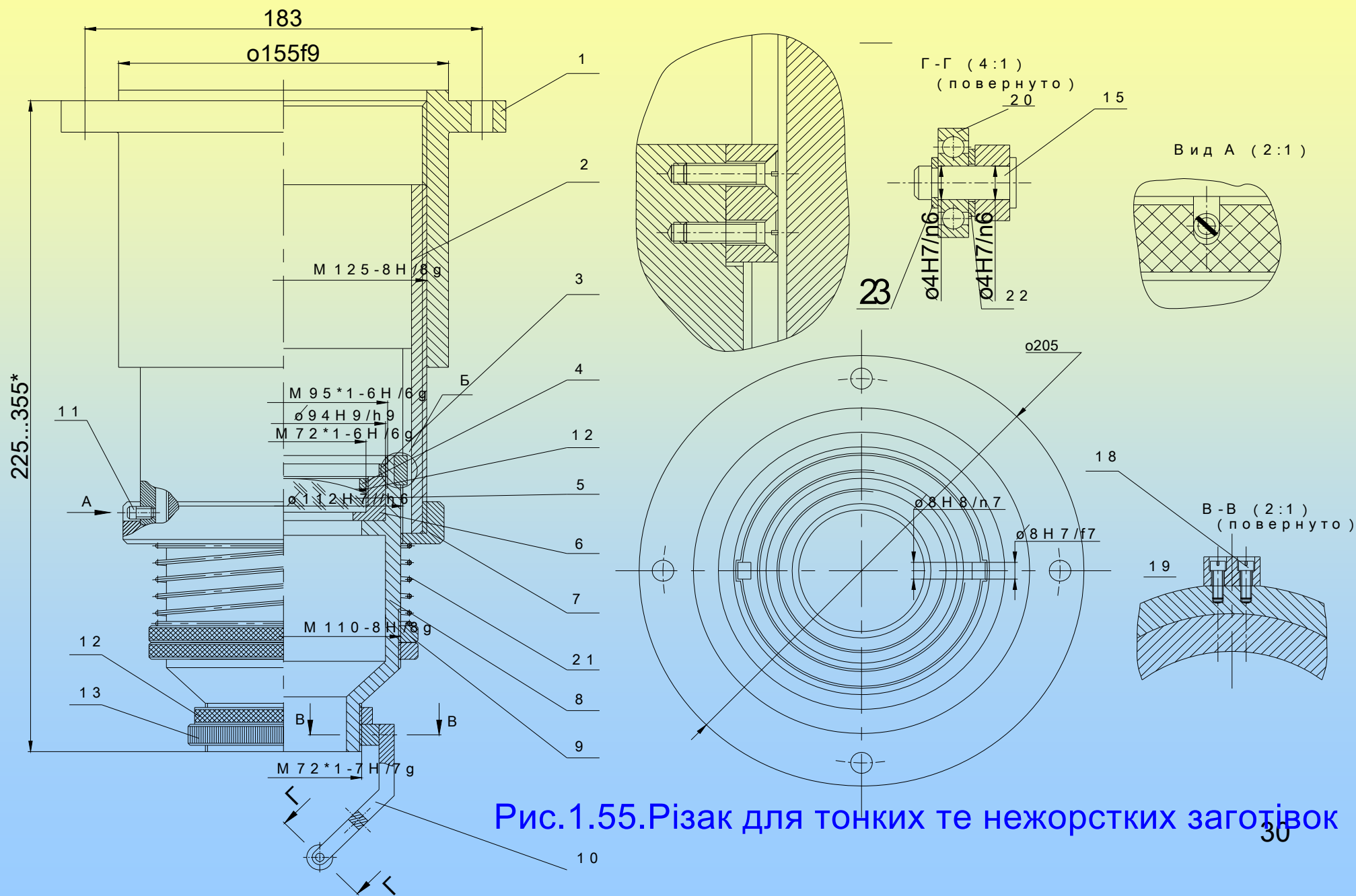


Рис.1.55.Різак для тонких те нежорстких заготовок

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

## 4. ЛТУ для нанесення знаків (гравірування) на поверхню виробу

В основі операцій гравірування лежить процес формування елементарних отворів, лунок (ненаскрізних отворів), рисок та пазів, розташованих за заданим законом, який створюється внаслідок поділення малюнку або змісту на окремі складові. Елементи малюнку можуть мати різне матеріальне оформлення:

- **отвори** (лунки) – за формою (попереку або повздовжньою), розмірами в цих напрямках та густиною розташування;
- **риски** (пази – наскрізні риси) – шириною та глибиною, формою попереку та густиною розташування (лінеатурою – кількістю ліній на дюйм);
- **сліди** зміненого за структурою матеріалу виробу без руйнування суцільності поверхні у вигляді зон круглої або витягнутої форми, літери;
- теж у вигляді **зон матеріалу зміненого кольору** тих же форм;
- теж у вигляді опуклих слідів тих же форм **із зміненою фарбою** (матового кольору).

Враховуючи широкий діапазон елементів знаку, що вони створюють, за формою, розмірами та принципом формування (**нагрів, плавлення, випаровування, хімічна деструкція**) важко створити **універсальну ЛТУ**, здатну реалізовувати відповідний **режим опромінення заготовки**, враховуючи досягнення обраного **виду поглинання променевої енергії** (поверхневе або об'ємне), що визначається відповідним сполученням довжини хвилі випромінювання та властивостями (електропровідністю та прозорістю) матеріалу заготовки. До того ж потрібно враховувати **три технологічні схеми утворення елементів малюнку [1]** та **можливості формування його змісту [24]**.

На рис.1.56 наведено оптичну схему ЛТУ для гравірування виробів із металів та неметалів із **змінними елементами** (лазером та оптичною системою)



# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

## Оптическая схема ЛТУ

для гравірування на поверхні виробів

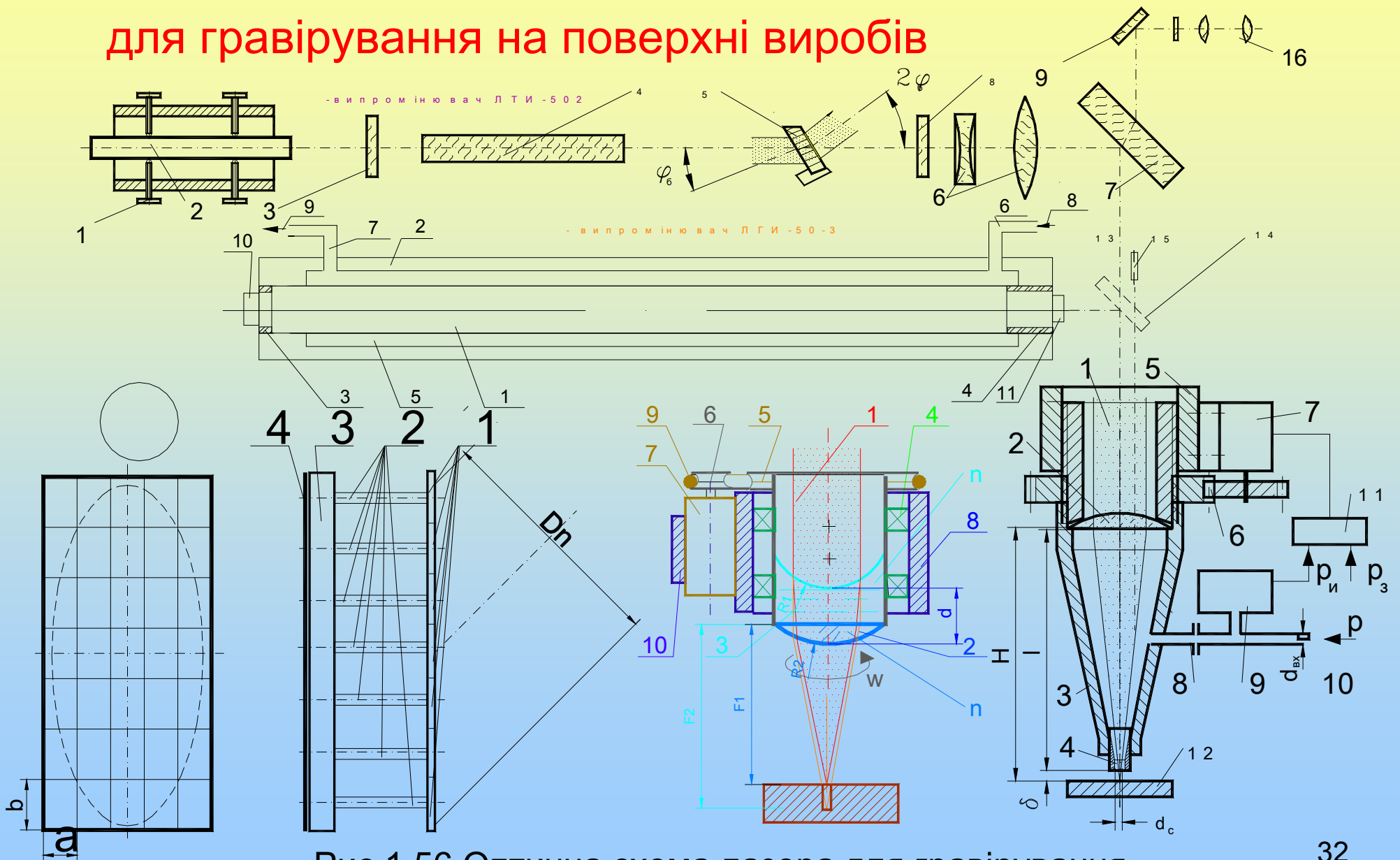


Рис.1.56. Оптическая схема лазера для гравірування



# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

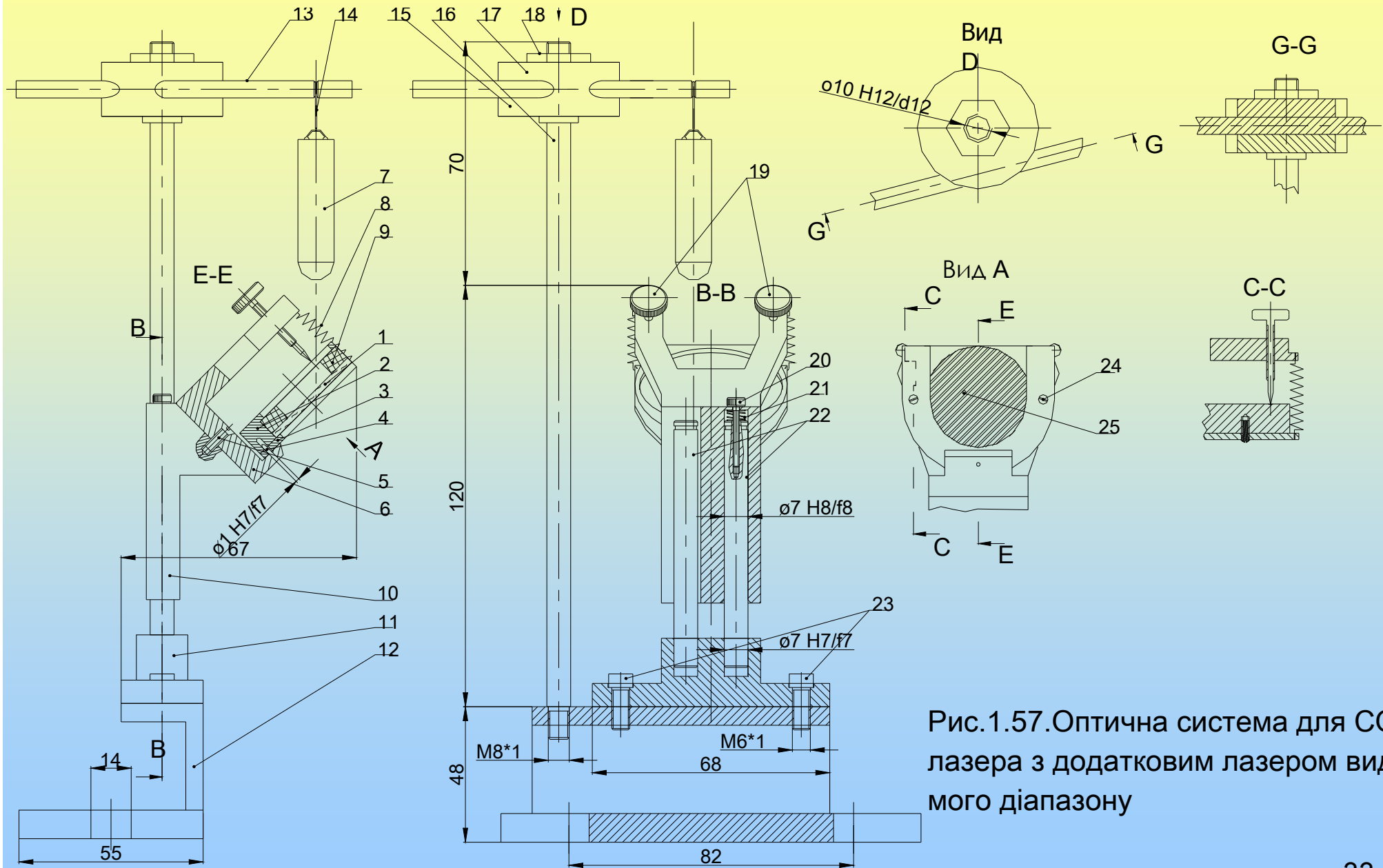


Рис.1.57. Оптична система для CO<sub>2</sub> лазера з додатковим лазером видимого діапазону

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

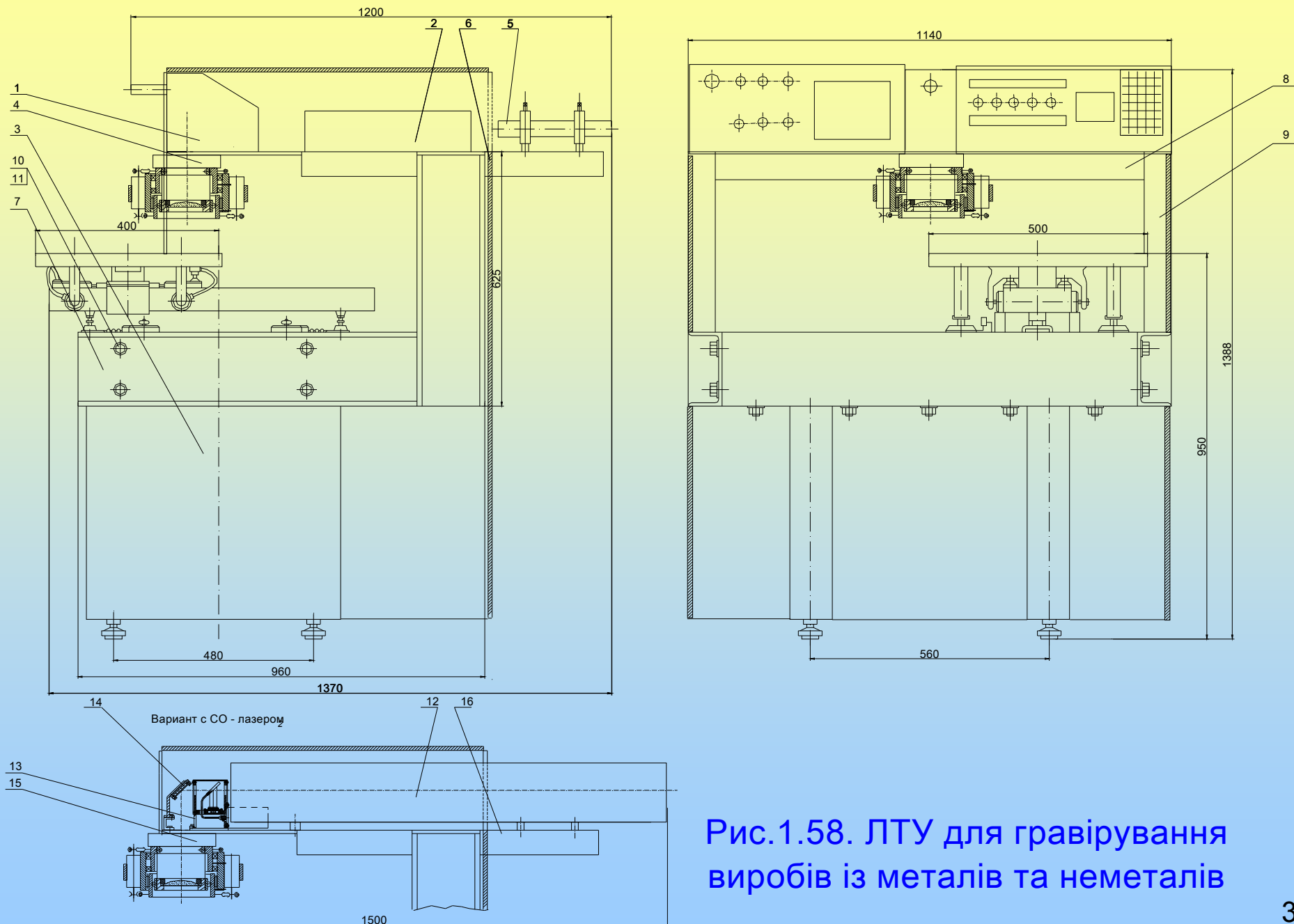


Рис.1.58. ЛТУ для гравірування виробів із металів та неметалів

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

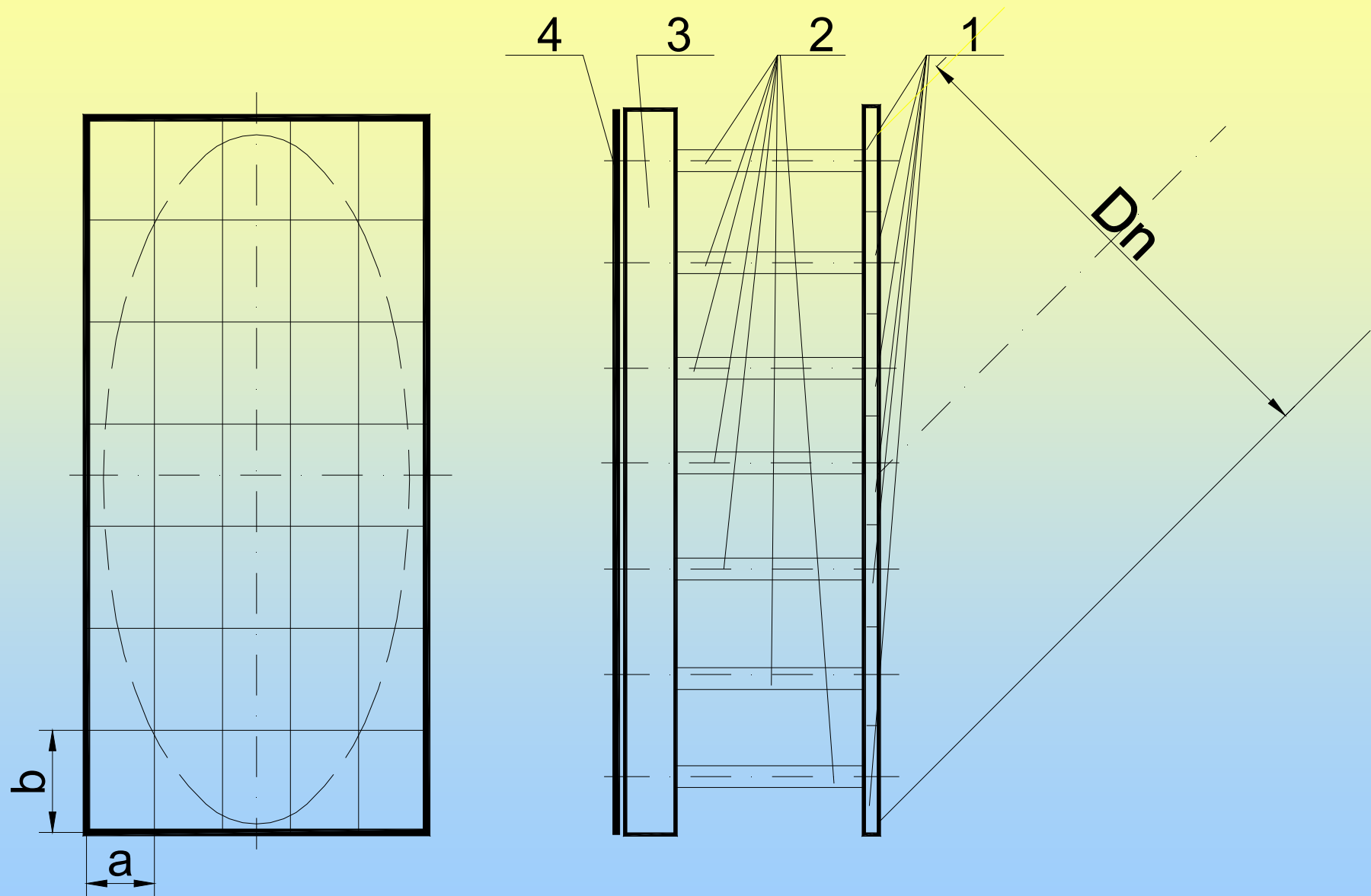


Рис.1.59.Дзеркало мозаїчне похиле

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ склад ЛТУ для ЛРО

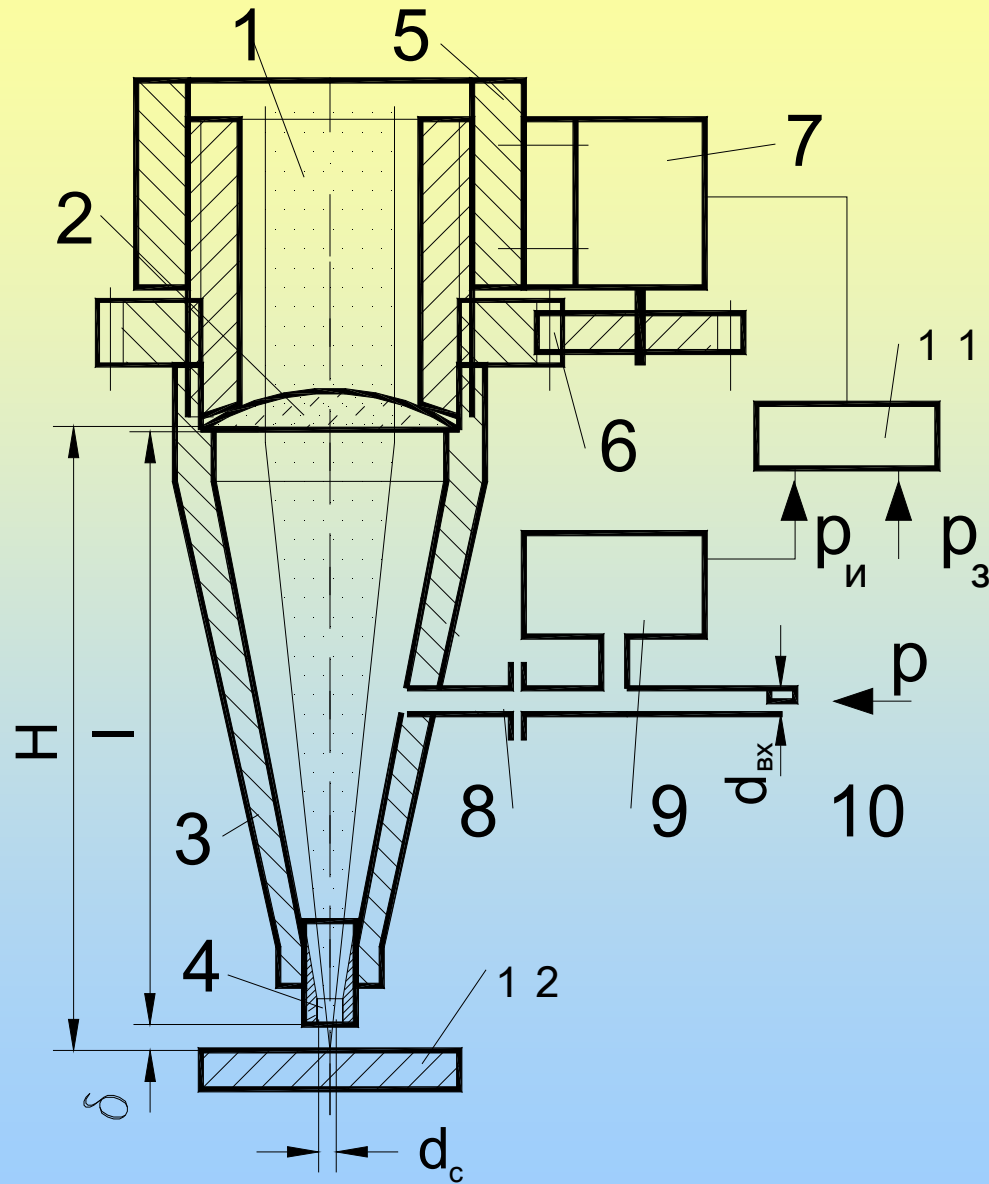


Рис. 1.60. Оптична система з автоматичним позиюванням відносно поверхні заготовки

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

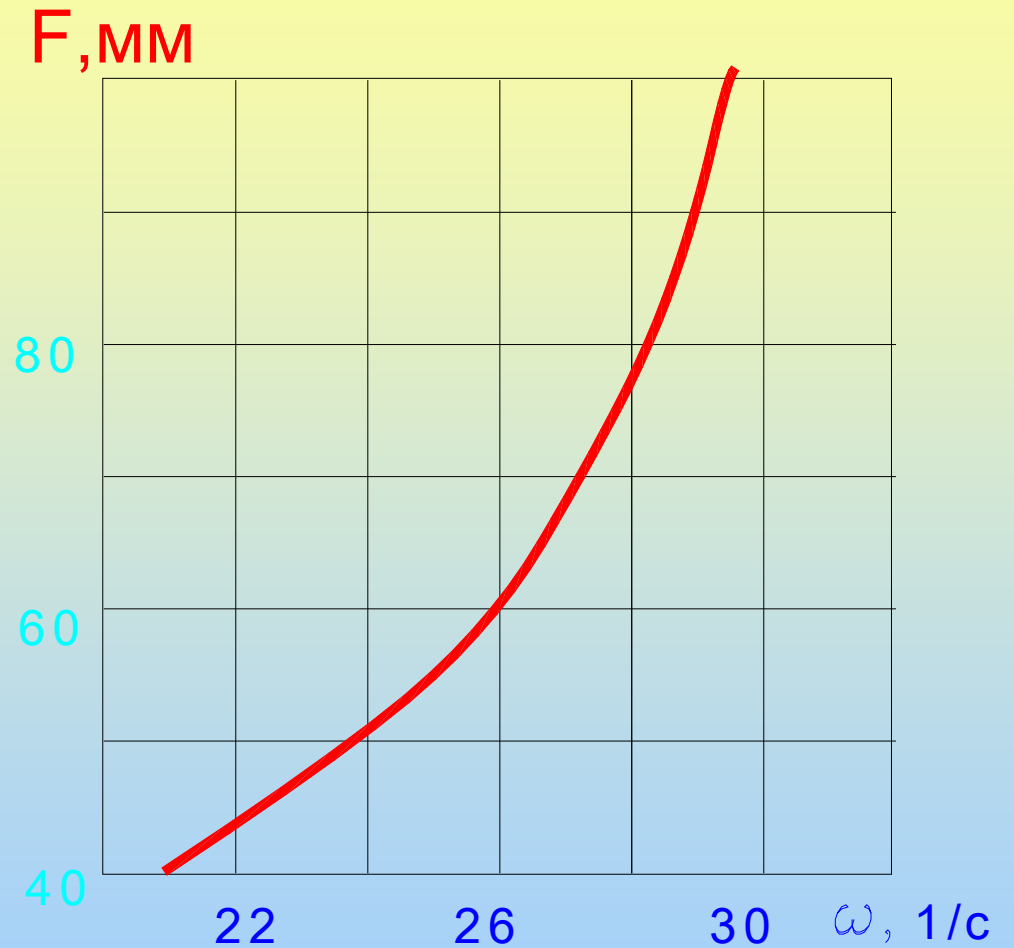
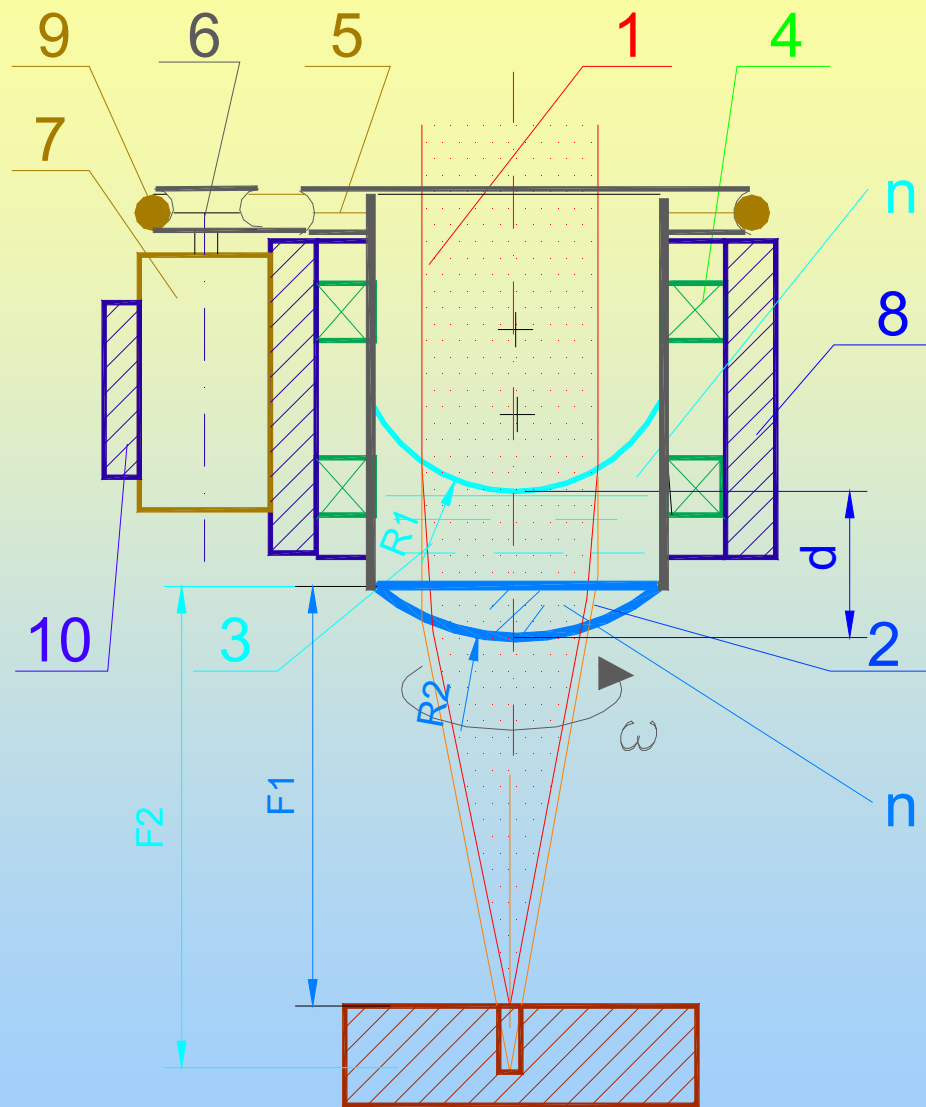


Рис. 1.61. Схема трансформатора з рідкою компонентою

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

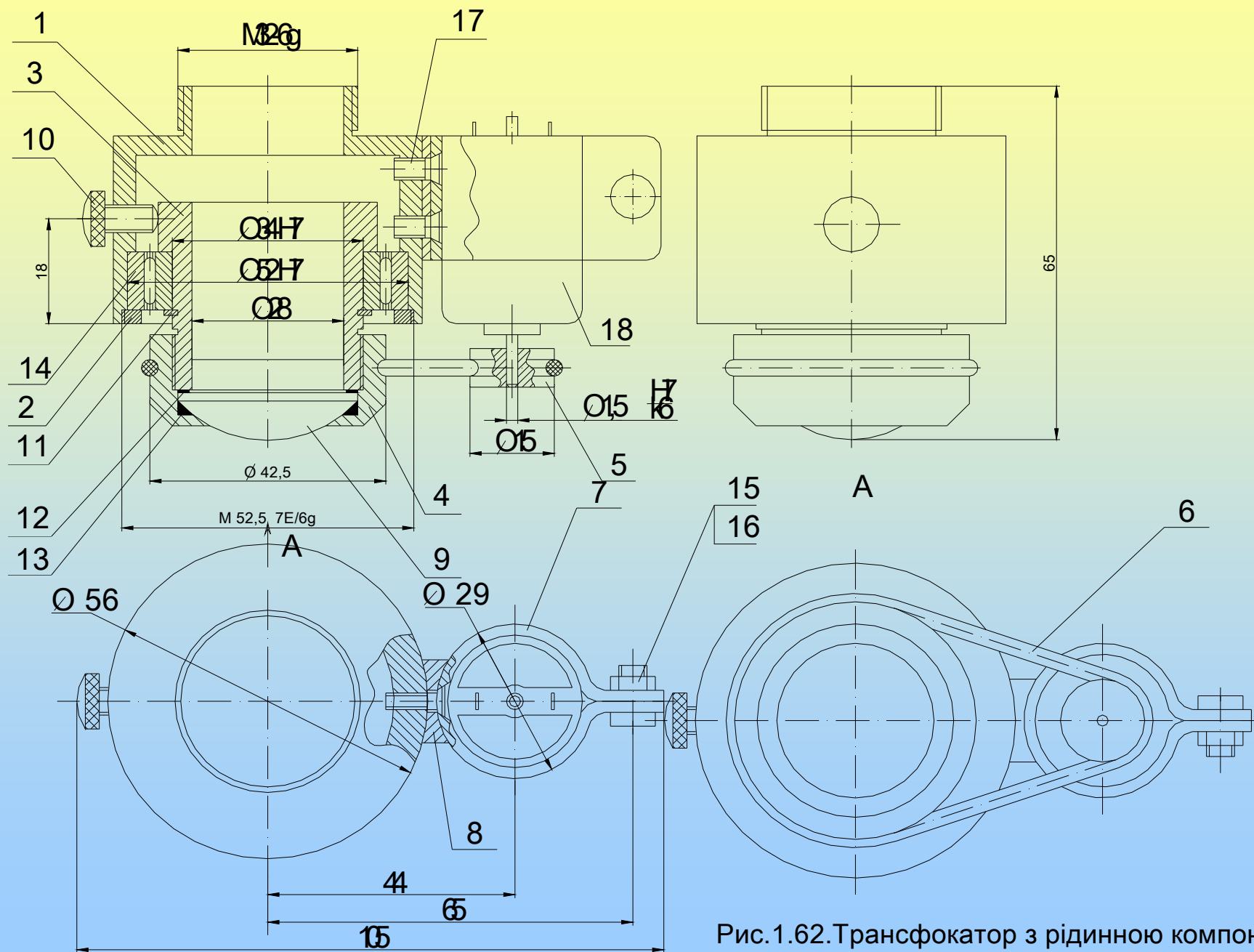


Рис.1.62. Трансформатор з рідинною компонентою

## 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

Випромінювач ЛТІ-502. Є твердо тільним лазером на гранаті (YAG:  $Nd^{+3}$ ) з безперервною накачкою та модуляцією добротності резонатора 3 – 8 за допомогою акустооптичного затвору 5 (АОЗ). В зв'язку з залежністю кута Бреґга від довжини хвилі випромінювання 100% модуляція досягається за рахунок виключення із процесу генерації поперечних мод шляхом обмеження об'єму активного середовища 4 з 8 мм до  $< 1,2$ , що приводить зниження середньої потужності випромінювання з 32 Вт до 8. Модуляція випромінювання без діафрагмування резонатора або до більшого, ніж  $\varnothing 1,2$  мм розміру, дозволяє отримати **гіпер-імпульсний** часовий режим генерації, який складається із імпульсної високо інтенсивної складової та безперервного випромінювання довжини хвилі, для якої кут відхилення дифрагованого на бігучій звуковій хвилі не є критичним ( $\alpha < \alpha_{бр} = \arcsin \lambda_0 / (2n\lambda_{ак})$ ), де  $\lambda_0$  - довжина хвилі випромінювання,  $n$  – показник заломлення елемента АОЗ,  $\lambda_{ак}$  - довжина акустичної хвилі, та можливе встановлення стоячої хвилі для неї в резонаторі. Довжина хвилі випромінювання  $\lambda = 1,06$  мкм дозволяє використовувати оптичні елементи із скла, кварцу та інших прозорих для видимого світла матеріалів, наприклад, відомі системи "Коростель" та СОК-1 (6, 7, 16). Для юстирування елементів резонатора лазера та центрування оптичних систем використовуються додаткові лазери (He-Ne 2 або напівпровідникові 16) видимого випромінювання. А для створення рідинної компоненти трансфокатора [25, 26] (рис.1.61) можуть застосовуватися рідини з показником заломлення  $n_p \sim n_c \approx 1,5$  (гліцерин,  $CCl_4$ , кремнійорганічні сполуки).

## 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

Випромінювач ЛГІ-50-3. Активне середовище: суміш газів  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{He}$ , причому робочою є молекула  $\text{CO}_2$  з довжиною хвилі випромінювання у далекій інфрачервоній зоні ( $\lambda = 10,6$  мкм). Режим роботи лазера – **імпульсний модуляцією струму накачування** активного середовища. Частота подачі імпульсів  $0,1 \div 5$  кГц, середня потужність випромінювання  $P_{\text{сер}} = 10$  Вт. Режим роботи лазера та квантова енергія складових випромінювання роблять **ефективною обробку неметалів** в режимі випаровування, тобто в операціях створення отворів (лунок), нанесення рисок, які можуть складати малюнки, текстові зображення, зміст елементів кліше, які використовуються в плоскому, високому та глибокому друці.

Системи перетворення пучка випромінювання в інструмент тієї, чи іншої операції базуються на дзеркальній оптиці або на заломлюючих елементах із **інфрачервоних матеріалів** таких, як  $\text{KCl}$ ,  $\text{Ge}$ ,  $\text{GaAs}$ , вирощування монокристалів яких оптичної якості та наступна їх обробка є складними технологічними задачами, тому за формою та геометричними параметрами вони менш різноманітні, ніж їх скляні прототипи. До речі, відсутня можливість використання волоконних світловодів в оптичних транспортувальних системах, створення волоконних лазерів з випромінюванням  $\lambda > 5$  мкм. Для перетворення променя лазера ЛГІ-50-3 створена оригінальна оптична система (рис.1.57) з похилим дзеркалом із кераміки (ситал) із дзеркальним покриттям із  $\text{Au}$  та лінзою із  $\text{ZnSe}$ , яка доволі прозора і для видимого випромінювання. Для її налагодження відносно поверхні заготовки використано вільно підвішений напівпровідниковий лазер  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  ( $\lambda = 0,62$  мкм).



# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

Елементи модернізації ЛТУ для їх спеціалізації

1. *Юстировочний стіл для додаткового лазера* (рис.1.45). Повинен мати 4 ступені свободи: дві – лінійні вздовж двох взаємно перпендикулярних осей в площині, нормальній до осі променя, та обертальні навколо них. В наведеній конструкції вертикальний напрям регулювання (лінійного та кутового) виконується трьома підпружиненими опорами 6. Горизонтальний напрям – від гвинтової пари 12-13 лінійно та кутовий – важелем 18 з фіксатором 16.

2. *Вузол мозаїчного дзеркала для СОК-1* [27] (рис.1.46). Дзеркало складено з 35 елементів 1 (рис.1.62), виготовлених з міді з полірованою та позолоченою робочою поверхнею, які закріплено на торцях циліндричних п'єзоелементів 2. Основа дзеркала встановлена на осі крокового двигуна, що своїм посадочним фланцем встановлюється в корпусі СОК-1 замість штатного похилого дзеркала.

3. *Трансфокатор на похилій лінзі* [28] (рис.1.47). Лінза 5 в оправі 4 встановлена в стакані, що обертається, 2 на двох осях 11 і має можливість вільно в них коливатися. Для можливості обертання стакану 2 він установлений в корпусі 1 в підшипнику 24 та має шків 3 для передачі руху обертання від крокового двигуна 14. Для нахилу лінзи 5 на її оправці 4 закріплено дисбаланс 13, у якого регулюється радіус його обертання. Із зменшенням кутової швидкості буде зростати кут нахилу лінзи, тобто прирощення робочого відрізка лінзи на величину  $\Delta l = F(1/\cos\gamma - 1)$ .

4. *Сканер на плоских пружинах* [29] (рис.1.48). Призначено для надання швидкісного руху (обертального, лінійного та комбінованого) променю по поверхні заготовки, що використовується в операціях трепанації отворів, ризок та розширення контурної лінії малюнків та текстів. Лінза 7 в оправі 6 підвішена на 2 плоских пружинах 13 на стакані 2, що має шків і може обертатися в підшипниках в корпусі приладу 1 від крокового двигуна 13 через ремінець 15. Другий двигун також через ремінець може обертати втулку 8 із шківом 21 в підшипнику, який стоїть в стакані 2, причому вона має ексцентричний отвір, що обіймає два штифти 9 в оправі 6.

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

Поворот ексцентричного отвору зміщує штифти 9 та оправку 6 вздовж напрямку найменшої жорсткості пружин 13 на відстань  $\pm(0 \div e)$ , тобто при його обертанні лінза 7 буде виконувати лінійні переміщення з амплітудою  $e$  (розмах  $2e$ ), а якщо зміщену лінзу будуть обертати зі стаканом 2, то промінь разом з лінзою бути рухатися вздовж кола діаметром  $2e$ . Сумісне обертання двох двигунів призведе до обертання за колом із змінюємим радіусом (спіраль).

5. *Оптична система комбінована СОК-1* (рис.1.49). Призначена для перетворення променя від лазера в робочій інструмент та налагодження його положення відносно поверхні заготовки. Її конструкцію модернізовано для використання більш точного та зручного методу двох зображень [30] в процедурі позиціонування. Для цього промінь додаткового лазера 1 (рис.1.43) поділяється в СОК-1 додатковим дзеркалом 24 на два, які ним та штатним дзеркалом СОК-1 направляються на робочий об'єкт, що створює на поверхні заготовки суперпозицію освітлених зон, за виглядом якої оцінюють ступінь налагодження їх взаємного положення.

6. *Модулятор резонатора із сферичних дзеркал* [30] (рис.1.52). Дзеркало 1 сформовано із пружинної намагніченої мембрани 1, на яку діють змінним магнітним полем від електромагніту. Змінення кривизни дзеркала 1 робить нестійкою конфігурацію резонатора, що не дозволяє утворюватися стоячої хвилі в резонаторі і **виключає генерацію**. При нерухомих положеннях мембрани в кінцях ходу накопичена інверсія заселеності в активному середовищі випромінюється імпульсами з підвищеною потужністю.

7. *Заслінка для випромінювача потужністю до 0,5 кВт* (рис.1.53). Швидкодіюча заслінка (затвор) має дві робочі пелюстки 3 із збільшеною площею поглинання, які установлені на двох осях: одна (2) з'єднана з валом двигуна 17, друга (1) - з віссю зубчастого колеса 5, що заціплена з колесом 4 на валу двигуна 17 та підпружинена плоскою пружиною 14. В нормальному положенні заслінку закрито, відкриття виконується спрацюванням двигуна 17 при стискуванні пружини. 42

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

8. *Різак для вирізання отвору, формування різку (пазу) з оздоблюванням крайки* [31] (рис.1.54). Для реалізації операції використовують асиметричний за формою інструмент – лазерний промінь, який створюється перетворенням променя ексцентричною лінзою, або нахилом променя перед нею. Слідкування за контуром оброблювального елементу асиметричним променем можна реалізувати, використовуючи сканер (рис.1.48) з програмним керуванням. Для спрощення операції можна використати різак запропонованої конструкції з автоматичним поворотом лінзи вздовж контуру різання. Для цього різак, який вільно може обертатися в підшипнику 6, має каретку з підпружиненими (15) роликками 31, що рухаються при відносному переміщенні її та заготовки, зменшуючи або виключаючи тертя роликів о поверхню останньої тобто повертаючи лінзу 1.

9. *Різак для розмірної обробки нежорстких листових заготовок* (рис.1.55). Для підтримання початкових (режимних) умов опромінення тонколистової заготовки можна використати різак з механічним упором. При відносному переміщенні різака та заготовки його ролик 20, навантажений пружиною 21, притискує заготовку до столу, що забезпечує сталість відстані між ними під час операції.

10. *Оптична система для CO<sub>2</sub>-лазера* (рис.1.57). Похиле дзеркало 1 для направлення променя виготовлене із керамічного матеріалу (ситал, полікор) і має дзеркальну поверхню, покриту Au, і встановлено в механізм його центрування вздовж двох лінійних координат та з коливання відносно їх осей. Для налагодження положення заготовки відносно робочого об'єктиву, виготовленого на базі лінзи із інфрачервоного, але прозорого для видимого світла матеріалу SeZn в дзеркалі 1 в стороні від апертури робочого випромінювання виготовлено отвір  $\varnothing 0,3$  мм вздовж осі променя. Над дзеркалом за допомогою гнучкого підвісу 14 (шнур) підвішено напівпровідниковий лазер 7, вісь променя якого суміщено з віссю отвору 25. Розмір і положення освітленої зони поверхні заготовки відносно осі робочого променя дозволяють візуалізувати оцінку положення заготовки. Для підвищення точності процедури поверхня заготовки повинна бути нормальною до осі робочого променя.

# 1.5. Приклади конструкцій та елементний склад ЛТУ

11. *Різак з пневматичним контролем відносного положення лінзи та заготовки* [32] (рис.1.60). Різак має традиційну конструкцію, однак його сопло 4 для виходу променя та формування струменя газу каліброване. Повітря, яке входить до різачу контролюється за тиском та витратою (встановлено вхідне сопло  $10 d_{ex}$ ), а його порожнину підключено до датчику тиску 9. Його показники залежать від тиску на вході різачу та його витрати через сопло 4, що обмежується розміром сопла 4 та відстанню від поверхні заготовки  $\delta$ :  $S = \pi d_{ex} \delta$ . Задана відстань порівнюється з її виміром за допомогою датчика 11 і різниця компенсується переміщенням різача приводом 6 – 7.

12. *Трансфокатор з рідинною компонентою* (рис.1.61, 1.62). Застосовується для оперативного змінення умов опромінення при виготовленні глибоких отворів або формування малюнку на похилих поверхнях заготовок. Плавне регулювання фокусної відстані виконується внаслідок змінення кривизни однієї з заломлюючих поверхонь лінзи. Це досягається використанням рідини для її формування за умови однакової оптичної щільності рідини та скла. Об'єктив має вигляд стакану, дном якого є лінза з фокусною відстанню  $F$  (радіус кривизни поверхні  $R_{л1} = \infty$ , а  $R_{л2} = F(n-1)$ ). Якщо стакан заповнити відповідною рідиною та розташувати горизонтально її поверхню, то при його обертанні з частотою  $\omega$  внаслідок змочування стінки та відцентрової сили поверхня рідини прийме криволінійну форму (парабола), з кривизною центральної частини  $R_1 \approx g/\omega^2$ . На рис.1.61 показано залежність фокусної відстані об'єктиву з лінзою  $F_{л} = 40$  мм при  $n_{ск} = n_p = 1,5$ :

$$F(\omega) = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{\omega^2}{g} - \frac{1}{R_2}\right) + \frac{(n-1)^2}{n - g\omega^{-2}R_2} d_{об}}$$

На рис.1.62 зображено конструкцію трансфокатора.



# Додаток до розділу 1 (завдання на СРС)

## (розділ 1.1)

1. Завдання на СРС 1: Встановити *технологічні критерії* вибору лазерного технологічного устаткування. Як впливає характер поглинання променистої енергії на вибір типу випромінювача? Обґрунтувати вплив характеру поглинання променистої енергії на якісні показники ЛРО різних матеріалів.
2. Завдання на СРС 2: Чим відрізняються лазери з активною речовиною на іоні неодиму ( $Nd^{+3}$ ) на базі скляної та кришталевої матриці за режимом випромінювання? Знайдіть пояснення цьому явищу, аналізуючи ізоляційні властивості матриць із різною структурою діелектриків. Продовжити порівняння лазерів волоконних та дискових.
3. Завдання на СРС 3: Проаналізуйте *методи доопрацювання* конструкцій лазерів на кристалічних елементах з метою поліпшення їх технологічних здібностей.
4. Завдання на СРС 4: Які методи використовують для *формування імпульсного режиму генерації*? Які види модуляторів застосовуються для цієї ж мети?
5. Завдання на СРС 5: Розробити або вдосконалити *схеми механічних модуляторів добротності* резонатора лазера.
6. Завдання на СРС 6: На якому принципі побудовані *модулятори для керування тонкою часовою структурою імпульсу випромінювання*? Створіть свої пропозиції конструкцій (схем) модуляторів добротності.

# Додаток до розділу 1 (завдання на СРС)

(розділ 1.2)

7. Завдання на СРС 7: Скласти перелік вузлів для ЛТУ різного призначення операцій ЛРО. Обґрунтувати вимоги до складових та визначити можливі шляхи модернізації ЛТУ для її пристосування до конкретних операцій
8. Завдання на СРС 8: Навести (виконати літературний огляд або створити) схеми або конструкції складових технологічного блоку ЛТУ. Для нових за визначенням керівника СРС та з його допомогою скласти необхідні документи для звернення в ІІВ для оформлення авторського права.
9. Завдання на СРС 9: Які переваги у випромінювачів різних типів? Проаналізуйте особливості обробки на налагоджених ЛТУ та за адаптивною схемою організації операції. Наведіть умови їх ефективного використання. Перерахуйте типи датчиків вимірювачів, які здатні вимірювати розмір обробки безпосередньо під час обробки? Наведіть схеми їх використання
10. Завдання на СРС 10: Навести (виконати літературний огляд або створити) схеми або конструкції складових технологічного модуля ЛТУ. Які додаткові вузли бажано використати для підвищення експлуатаційних можливостей ЛТУ? Для нових за визначенням керівника СРС та з його допомогою скласти необхідні документи для звернення в ІІВ для оформлення авторського права.
11. Завдання на СРС 11: Визначити бажану компоновку та склад ЛТУ з урахуванням новітніх за пошуком із доступних джерел лазерних систем, оптичних елементів та інших засобів впливу на якість технологічної операції. Запропонувати свої пропозиції з мотивів підвищення експлуатаційних можливостей ЛТУ.

# Додаток до розділу 1 (завдання на СРС)

(розділи 1.3 -1.5)

12. Завдання на СРС 12: Познайомитися з прикладами адаптивної організації операцій механічної обробки. Яким чином організовано активний контроль результату обробки? В якій формі задається критичний (допустимий) рівень показника? Який алгоритм використовується для порівняння дійсного та заданого рівня показника? Що є основою прийняття рішень про напрямки корекції технологічної операції? Які засоби впливу на режим обробки? Чи можлива адаптивізація операції за декількома критеріями одночасно?
13. Завдання на СРС 13: Порівняти методи керування рівнем різних показників операцій ЛРО (розмірів, показників якості, продуктивності, тощо). Яка особливість лазерної обробки впливає на стратегію та тактику організації ЛРО? Порівняйте алгоритми адаптивної організації операції в залежності від вимог до її результатів. Навести приклади вимог до результатів ЛРО, що змінюють форму адаптивної організації.
14. Завдання на СРС 14: Винайти матеріали за темою пневматичних систем контролю стану процесу чи працездатності засобу та оцінити їх переваги та недоліки вимірювальних схем. Оцінити їх застосовність для операцій ЛРО. Дати пропозиції схем їх організації.
15. Завдання на СРС 15: Визначити можливий склад гнучкого автоматизованого виробництва з максимальним використанням здатності до оперативного керування пучком лазерного випромінювання, виходячи із сучасного рівня лазерної техніки, технологічного оснащення та новітніх способів та схем обробки.
16. Завдання на СРС 16: Проаналізувати приклади оптичної комплектації різних за призначенням ЛТУ. Дайте пропозиції до вдосконалення схем за комплектністю та за її реалізацією, використовуючи патентний пошук за сьома державами (США, Великобританія, Японія, РФ, Франція, Швейцарія, ФРН.



# Контрольні запитання та завдання

1. Перерахувати технологічні критерії вибору лазерного технологічного устаткування. Як впливає характер поглинання променистої енергії на вибір типу випромінювача? Чим відрізняються лазери з активною речовиною іон неодиму ( $\text{Nd}^{+3}$ ) на базі аморфної (скляної) та кристалевої матриці за режимом випромінювання. Які переваги у випромінювачів різних типів?
2. Проаналізувати особливості обробки на налагоджених станках та за адаптивною схемою організації операції. Навести умови їх ефективного використання.
3. Які дві різновидності адаптивної організації технологічної операції використовують для обробки отворів пучком лазерного випромінювання? Яким чином досягається точність обробки за кожною з цих схем?
4. Перерахувати типи датчиків вимірювачів, які здатні вимірювати розмір обробки безпосередньо під час обробки? Наведіть схеми їх використання.
5. Навести алгоритм виконання та приклади виконання операції з адаптивною її організацією при обробці отворів з нормованим кінцевим сумарним результатом.
6. Навести алгоритм виконання та приклади виконання операції з адаптивною її організацією при обробці системи точних отворів.
7. Як організаційно будуються технологічні операції лазерної обробки отворів з контролем дійсного їх розмірів за допомогою пневматичних датчиків тиску або розходу? Які технологічні фактори використовується як керуючі для рішення різноманітних технологічних завдань?
8. Навести схему ЛТУ для обробки в адаптивному режимі: заготовки з одним отвором, яка має форму, доступну для герметизації внутрішньої порожнини.

## Контрольні запитання та завдання

9. Навести схему ЛТУ для обробки в адаптивному режимі: заготовки простої форми (диск, пластина, тощо) з одним отвором.
10. Навести схему ЛТУ для обробки в адаптивному режимі: заготовки довільної форми з багатьма отворами.
11. Навести оптичну схему ЛТУ для розмірної обробки виробів з металів.
12. За допомогою якого приладу виконується юстирування резонатора лазера та центрування оптичних елементів оптичної системи.
13. Який склад ЛТУ для формування розмірних елементів (отворів, лунок, ризок, пазів, різів) в заготовках із металів?
14. Який склад ЛТУ для формування розмірних елементів (отворів, лунок, ризок, пазів, різів) в заготовках із неметалів?
15. Які завдання вирішує набір технологічного оснащення, яким супроводжується модернізація ЛТУ для обробки виробів з металу?
16. Які завдання вирішує набір технологічного оснащення, яким супроводжується модернізація ЛТУ для обробки виробів з неметалів?
17. Навести оптичну схему ЛТУ для гравірування виробів із металу та неметалів. Яким чином пристосовується ЛТУ для обробки різних матеріалів?
18. Навести примірний склад технологічного оснащення для операцій гравірування. Які схеми гравірування використовуються в різних технологічних ситуаціях?
19. Як виконується налагодження оптичної системи СОК-1 ЛТУ відносно поверхні заготовки? Визначити особливості процедури та її недоліки. Який спосіб відносного позиціонування застосовується у модернізованій конструкції СОК-1?
20. Які особливості пристосування ЛТУ для гравірування заготовок із неметалів, що пов'язано з довжиною хвилі лазера на  $\text{CO}_2$ ?

# Література до 1 розділу

(розділ 1.1)

1. Котляров В.П. Технологія лазерної обробки (операції розмірної обробки). Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, - 2010. – 308с.
2. Углов А.А., Орехов М.В., Кокора А.И Увеличение эффективности размерной обработки излучением ОКГ // ФХОМ – 1976, №4
3. Басов Н.Б., Зуев Р.Е., П.Г.Крюков. Увеличение мощности импульсного оптического квантового генератора на рубине модуляцией добротности резонатора // ЖЭТФ – 1962, т. 43, в 1(7). - С. 353-355
4. Котляров В.П. Технологічне оснащення лазерних комплексів. Підручник. Електронне видання. Київ: НТУУ «КПІ», - 2013. – 592с.
5. Патент 3.619.032 США, G02F 350/161, оп. 09.11.1971р.
6. А.с. 1610707 СРСР, МКІЗ В23К 26/00. Лазерный излучатель для технологических установок [Текст] / В. П. Котляров, И. И. Штома (СРСР). – № 4683135/31–27 ; заявл. 24.04.1989 ; (без публ.)

# Література до 1 розділу

(розділ 1.2)

7. Звелто О. Принципы лазеров. М.: Мир, - 1984. - 395с.
8. Котляров В.П. Технологічне оснащення лазерних комплексів. Підручник. Електронне видання. Київ: НТУУ «КПІ», - 2013. – 592с.
9. Коваленко В.С., Романенко В.В., Олещук Л.М. Малоотходные процессы резки лучом лазера. Киев: Техніка, - 1987. -142с.
10. Крейг Д. Роуз Рубиновый лазер для точного сверления отверстий. – Электроника, 1985, №14, С.80-81
11. А.с. 965921 СРСР, МКІЗ Н 01 S 3/08. Лазер [Текст] / В. П. Котляров, В. В. Романенко, В. С. Коваленко (СРСР). – № 3268240/18–25 ; заявл. 31.03.1981 ; (без публ.).
12. Петров М. Лазерная обработка материалов в электронике. Сб.: Компоненты и технологии, 19.10.2000.10.19

# Література до 1 розділу

(розділ 1.3)

13. А.с. СССР № 965677 МКІ<sup>3</sup> В23К 26/08. Установка для пробивки отверстий [Текст] / В.П.Котляров, В.С.Коваленко (СРСР). - 3266926/25-27, заявл. 31.03. 81 ; оп. 15.06.1982р.
14. А.с. СРСР № 1178822 МКІ<sup>3</sup> В23К 26/00. Установка для пробивки отверстий [Текст] / В.П. Котляров, Ю.В. Коноваленко, В.С. Коваленко (СРСР). - 3726092 /25-27, заявл. 13.04.1984 ; (без публ.)

# Література до 1 розділу

(розділ 1.5)

15. А.с. N1202176 МКІ<sup>3</sup> В23К 26/00. Способ газолазерной резки горючих материалов [Текст] / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, В.В.Романенко (СРСР). – 3773544/ 25-27 , заявл. 20.06.1984 ; (без публ.)
16. А.с. 1610707 СРСР, МКІ<sup>3</sup> В23К 26/00. Лазерный излучатель для технологических установок [Текст] / В. П. Котляров, И. И. Штома (СРСР). – № 4683135/31–27 ; заявл. 24.04.1989 ; (без публ.)
17. А.с. 792732 СРСР, МКІ<sup>3</sup> В23К 26/00. Пристрій для обробки отвору випромінюванням лазера [Текст] / В. П. Котляров, В. С. Коваленко (СРСР). – № 2713994/25–27 ; заявл. 17.01.79 ; (без публ.).
18. А.с. 1757347 СРСР, МКІ<sup>3</sup> В23К 27/00. Об'єктив – сканер [Текст] / В.П. Котляров, В.П. Царук (СРСР). - №4829301/25-27 ; заявл. 20.03.1990 ; (без публ.)
19. А.с. 1262839 СРСР, МКІ<sup>3</sup> В26К 26/00. Установка для лазерной обработки [Текст] / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, М.І.Анякін (СРСР), №3858960/25-27; заявл. 21.02.1985 ; (без публ.)
20. Котляров В.П., Коваленко В.С., Анякин Н.И. ОКГ для лазерных технологических установок // Сб. Электрохим. и электрофиз. методы обр-ки материалов, Тула: ТПИ – 1985. - С. 31-35
21. А.с. N1609004 СРСР, МКІ<sup>3</sup> В23К 26/00. Устройство для лазерной обработки [Текст] / В.П. Котляров, Ю.І. Симонов (СРСР), заявл. 22.07.1990 ; (без публ.)
22. А.с. 1771909 СРСР, МКІ<sup>3</sup> В26К 26/00. Газолазерна установка для контурного різання [Текст] / В.П.Котляров, В.П.Царук (СРСР), №4904354/25-27; заявл. 22.01.1991р. ; опубл. 1992 , Бюл. №40. – 3 с. : іл.
23. Позитивне рішення по заявці №4829301/10 (СРСР) Лазерна технологічна установка з автоматичним фокусуванням об'єктиву. 53  
В.П.Котляров, В.С.Коваленко (СРСР)

# Література до 1 розділу

(розділ 1.5)

24. Котляров В. П. Лазерна технологія в поліграфії. В.П. Котляров, П.О.Киричок - Київ : НТУУ «КПІ» ВПІ ВПК «Політехніка». – 2012. – 324 с. : іл. ; 20 см. – Бібліогр.: с. 317-323. – Пред. показ.: с. 312–316. – 500 екз. – ISBN 978-966-622-494-4
25. А.с. 574895 СРСР, МКІЗ В23К 26/00. Об'єктив [Текст] / В. С. Коваленко, В. П. Дятел, Ю. В. Кобилянський (СРСР). – № 2630221/25–27 ; заявл. 19.06.78 ; (без публ.).
26. Патент 74620 Україна, МКІЗ В23К 26/00. Пристрій для зміни фокусної відстані [Текст] / В.П. Котляров, М.Ю. Вариво́да - № u 2012 02962 ; заявл. 13.03.2012 ; опубл. 12.11.2012, бюл. №21. 3 с. : іл.
27. А.с. 1262839 СРСР, МКІЗ В26К 26/00. Установка для лазерної обробки [Текст] / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, М.І.Анякін (СРСР), №3858960/25-27; заявл. 21.02.1985р., (без публ.)
28. А.с. 792732 СРСР, МКІЗ В23К 26/00. Пристрій для обробки отвору випромінюванням лазера [Текст] / В. П. Котляров, В. С. Коваленко (СРСР). – № 2713994/25–27 ; заявл. 17.01.79 ; (без публ.).
29. Патент України № 86593 В23К 26/08/. Сканер пучка лазерного випромінювання. [Текст] / В.П. Котляров, О.І Рибкін - № u 2013 06330 ; заявл. 22.05.2013 ; опубл. 10.01.2014, бюл. №1. 3 с. : іл.
30. Котляров В.П., Коваленко В.С., Анякин Н.И. ОКГ для лазерных технологических установок // Сб. Электрохим. и электрофиз. методы обр-ки материалов, Тула: ТПИ – 1985. - С. 31-35
31. А.с. 1771909 СРСР, МКІЗ В26К 26/00. Газолазерна установка для контурного різання [Текст] / В.П.Котляров, В.П.Царук (СРСР), №4904354/25-27; заявл. 22.01.1991р. ; опубл. 1992 , Бюл. №40. – 3 с. : іл.
32. Заявка Японії № 59-4509, В23К 26/02, оп. 13.03.1984р.