

Лазерна розмірна обробка

Розділ 3

Презентація 5

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 3. **Заходи та пристрої для додаткового вдосконалення технологічних операцій ЛРО** *(подовження)*

Вступ	През. №5, сл.№3
3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин	През. №5, сл.№8
3.2. Методи підвищення якості ТО ЛРО порожнин	През. №6, сл.№4
3.3. Методи підвищення якості лазерного розмірного вирізання пазів	През №6, сл.№21
3.4. Автоматизація і адаптивна організація ТО ЛРО	През. №7, сл.№5
Додаток до розділу 3 (завдання на СРС)	През. №7, сл.№41
Контрольні запитання та завдання	През. №7, сл.№51
Бібліографічний опис	През. №7, сл.№57

Розділ 3. Заходи та пристрої для додаткового вдосконалення технологічних операцій ЛРО (подовження)

Вступ	През. №5, сл.№4
3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин	През. №5, сл.№8
<i>3.1.1. Підвищення та стабілізація рівня поглинання енергії лазерного випромінювання поверхнею заготовки</i>	През. №5, сл.№9
<i>3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки</i>	През. №5, сл.№23
Додаток до розділу 3.1. (завдання на СРС)	През. №5, сл.№41
Контрольні запитання та завдання	През. №5, сл.№43
Бібліографічний опис до розділу 3.1.	През. №5, сл.№45

Вступ

Необхідність в розробці способів та засобів додаткового вдосконалення ТО виникає в разі **утруднень** в досягненні визначених або запланованих показників технологічної операції, в тому числі розмірних, якісних, спеціальних та техніко-економічних. Можливі випадки, коли їх застосування викликає **досягнення дотичних результатів**, але з меншими витратами і на досяжному обладнанні.

Деталізуючи мету цього етапу проектування технологічної операції ЛРО, можна стверджувати, що результатами створеного ефективного рішення може бути також **підвищення її ефективності та продуктивності**, досягнення заданого **рівня якості**, а також **додаткове** поліпшення експлуатаційних властивостей виробу, що досягається за рахунок використання **особливих властивостей пучка** лазерного випромінювання.

Підвищення ефективності операцій досягається за рахунок збільшення частини енергії лазерного випромінювання, яку корисно використано, **забезпечення** найменш енергоємного механізму руйнування матеріалу заготовки, а також **залучення** додаткових (бажано дешевших) видів енергії, сприяючих підвищенню продуктивності обробки.

Завдання **підвищення якості** результатів обробки зводиться до **скорочення** кількості джерел початкових нестабільностей процесу, а також **оптимізації** послідовності переходів операції для найменшого реагування на вхідні, початкові обурення процесу обробки.

Вступ (подовження)

Деякі додаткові ефекти, виявлені як супутні тим або іншим операціям ЛРО, можуть бути посилені як в результаті відповідної корекції режимів, так і за рахунок певної організації процесу, внаслідок чого проявляються ті або інші особливості механізму взаємодії пучка лазерного випромінювання із заготовкою.

Вживання додаткових засобів вдосконалення операцій ЛРО виправдане при недостатній продуктивності і якості результатів обробки. Так, при розробці операції обробки системи точних порожнин, необхідно, в першу чергу, удосконалювати ті прийоми, нестабільність яких вносить найбільш високі добавки до тієї або іншої складової сумарної похибки операції. Однак, може бути потреба в прийомах, які вирішують інші задачі, наприклад, полегшення досягнення заданого результату обробки і які не укладаються в наведену вище структуру заходів.

Для прикладу можна привести спосіб опромінення провідника в операції видалення ізоляції, що виключає необхідність його обертання (рис.3.1) за рахунок організації додаткового опромінення тильної сторони ділянки заготовки (провідника) 1 пройденим мимо нього пучком випромінювання 2 за допомогою складеного дзеркала 3-4, що направляє пучок на залишки ізоляції 5, які знаходяться з тильного боку провідника 1 по відношенню до циліндричної лінзи 6 [38].

Вступ (подовження)

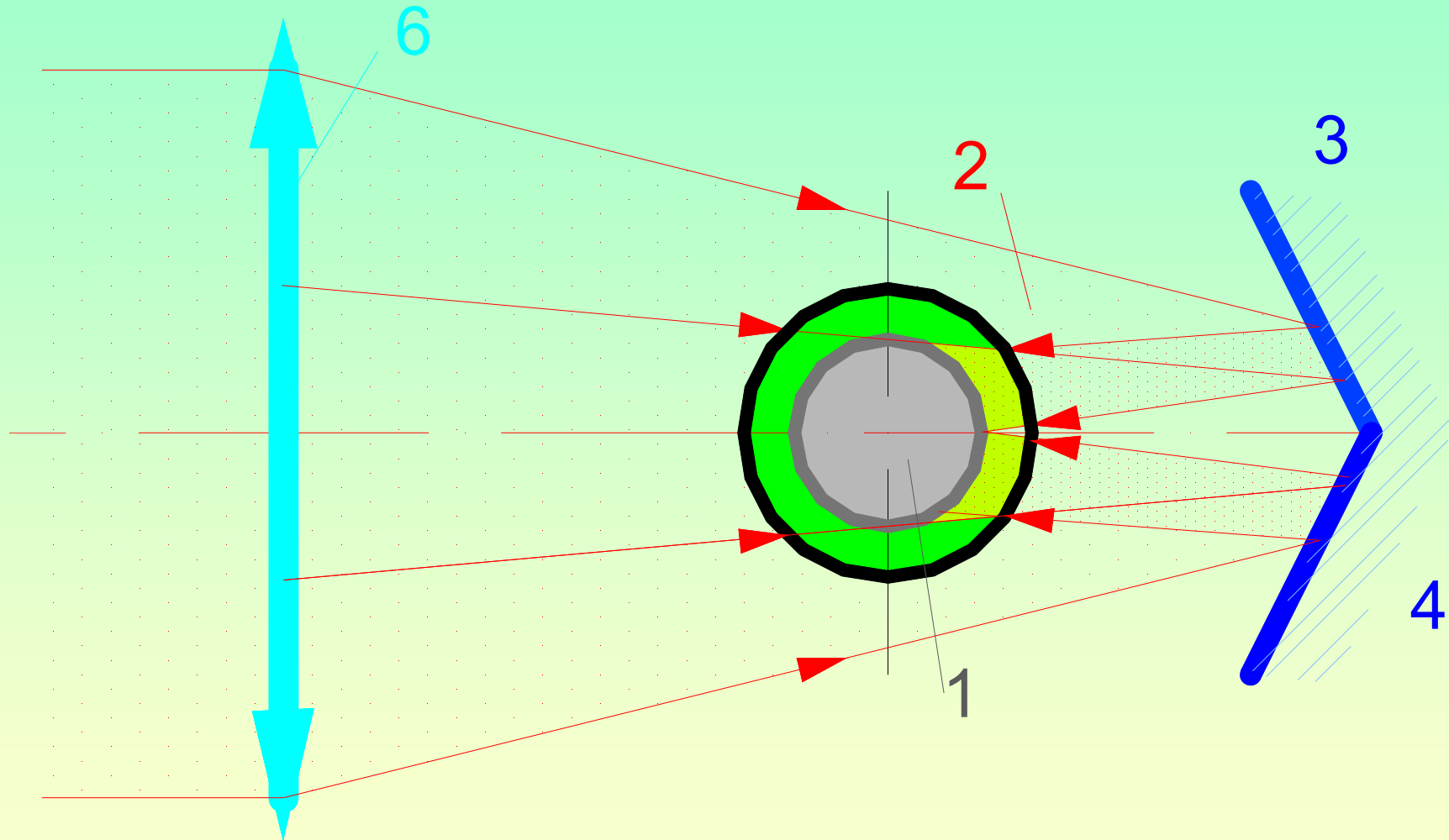


Рис.3.1. Схема опромінення провідника для зняття ізоляції без його обертання

Вступ (подовження)

Метою розробки способів вдосконалення ТО ЛРО та засобів для їх реалізації:

1. Підвищення ефективності технологічних операцій за рахунок забезпечення заданого (і підвищеного) рівня поглинання енергії лазерного випромінювання та оптимізації використання теплового потоку, створеного лазерним опроміненням.
2. Способи і засоби підвищення якості операцій ЛРО порожнин.
3. Способи і засоби підвищення якості лазерного розмірного вирізання пазів.
4. Створення додаткових ефектів, які додають виробу нові корисні експлуатаційні властивості за рахунок відповідної корекції режимів обробки або певної організації послідовності переходів.
5. Автоматизація та адаптивна організація операцій.

Ці засоби вживаються виправдано, якщо перераховані вищі властивості ТО недостатні або недосяжні лише при впливі на режим обробки, наприклад, коли один із показників ТО повинен мати високий рівень приватної бажаності порівняно з іншими і не може бути досягнутий оптимізацією режимів обробки (дивись Презентацію №4 слайди 10-11).

Технічне забезпечення даних прийомів вдосконалення операцій в більшій частині розглядається в дисципліні "Спеціальні елементи і оснащення лазерних технологічних комплексів".

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

Ефективною можна вважати таку технологічну операцію, в результаті виконання якої одержуються задані технологічні результати (кількісні та якісні) **в найкоротший термін з мінімальними витратами**. Зважаючи на те, що основну складову **собівартості** виробу формує вартість машинного часу обробки (п.8 стор. 28 [1]), в лазерній технології ця складова набуває більше значення внаслідок низького рівня ККД лазерного обладнання. Тільки в останні роки створено ефективні лазерні системи (твердо тільні лазери з діодним накачуванням, **дискові**, діодні та **волоконні** лазери), ККД яких збільшено до 10-20%, тоді як найбільш поширені лазери (YAG:Nd⁺³ та CO₂) мають ефективність 2-10%. Вважаючи на ці обставини, можна визначити шляхи досягнення бажаної мети:

- **підвищення та стабілізація рівня поглинання енергії лазерного випромінювання поверхнею заготовки на всьому протязі операції;**
- **використання економічного та ефективного механізму формоутворення порожнини пучком лазерного випромінювання;**
- залучення **додаткових (дешевших) видів енергії** для зниження витрат енергії випромінювання, або для скорочення машинного часу.

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.1. Підвищення та стабілізація рівня поглинання енергії лазерного випромінювання поверхнею заготовки

Метою розробки цих методів є підвищення рівня поглинання випромінювання слабо поглинаючими матеріалами (дзеркальними або прозорими) та стабілізація рівня поглинання поверхні заготовки і заготовок однієї партії (постачання).

У останньому випадку усувається необхідність в ретельній підготовці поверхонь заготовок, усунення відмінностей в наявності оксидів, грязі і інших, орієнтації шорсткості відносно вектора поляризації пучка випромінювання. Основні критерії, що враховуються при виборі методу підвищення рівня поглинання, стосуються зручностей його реалізації, необхідності в додаткових технологічних операціях, а також в оперативності виконання останніх.

- **об'єкт впливу:** заготовки із прозорого матеріалу або з “дзеркальною” поверхнею;
- **метод діяння:** підвищення та стабілізація процесу поглинання для кожної та всіх заготовок із партії;
- **критерії оцінки методу:** зручність в реалізації, відсутність необхідності в додатковому переході (операції) для його виконання, оперативність останнього та ліквідація його наслідків.

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

а). Оптичні методи підвищення рівня поглинання

1. Найбільш ефективними є оптичні методи підвищення рівня поглинання за рахунок **оптимізації схем опромінення**. Так, до останніх засобів можна віднести спосіб скорочення долі відбитого випромінювання [39], що передбачає орієнтацію напрямку вектора поля випромінювання уздовж шорсткості поверхні заготовки і його нахил відносно нормалі до останньої на кут, більший кута Брюстера (рис.3.2):

$$\varphi_B = \arctg(n_M/n_C).$$

де: n_M і n_0 - показники заломлення матеріалу заготовки і повітря ($n_0 \cong 1$).

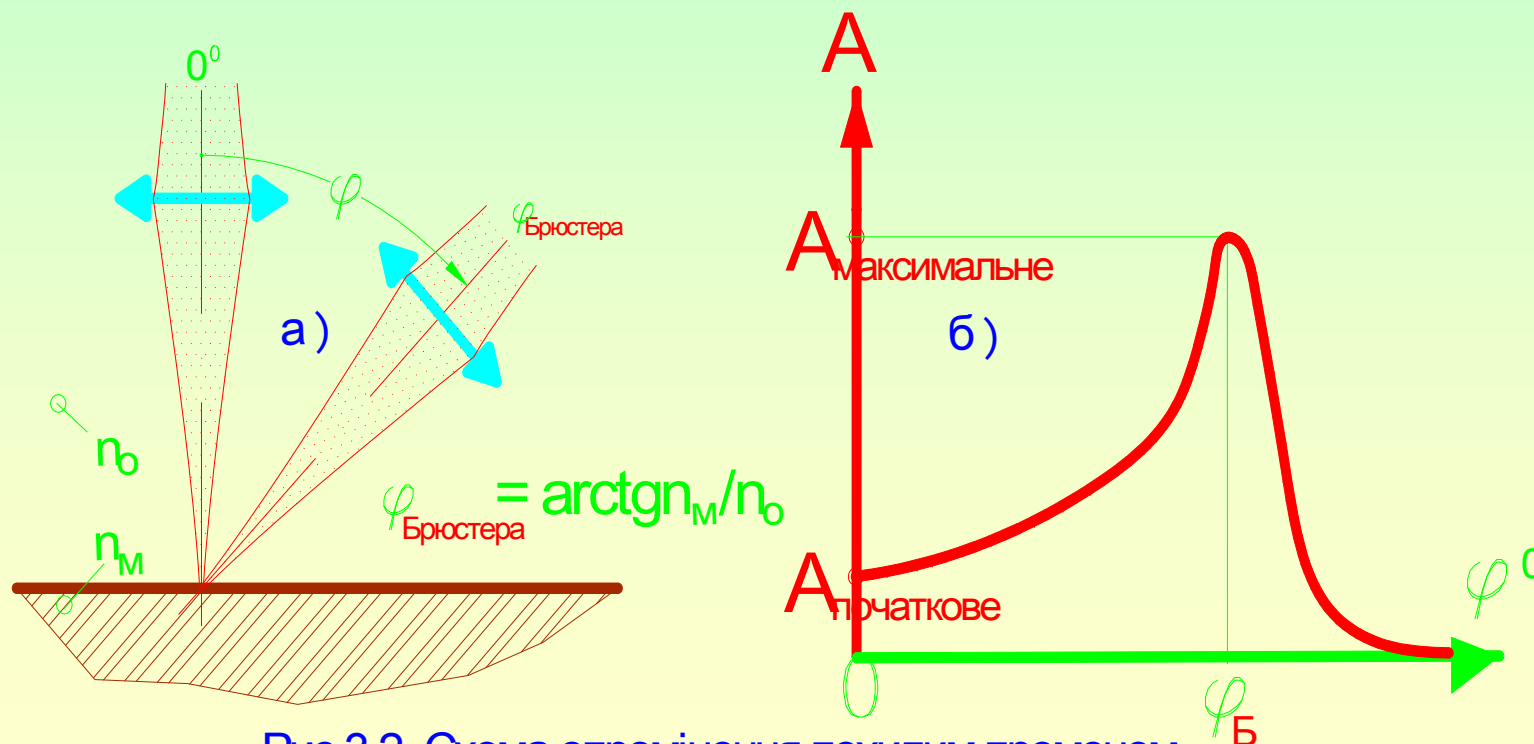


Рис.3.2. Схема опромінення похилим променем

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

а). Оптичні методи підвищення рівня поглинання

2. Істотними перевагами володіють **способи променевого підвищення** поглинання випромінювання поверхнею заготовки. До них можна віднести **спосіб попередньої ініціації** поглинання швидким переводом поверхневого шару матеріалу заготовки в стан іррегулярності, наприклад, **випереджаючи подачу** імпульсного або безперервного робочого випромінювання в зону обробки її опроміненням **коротким пічком** того ж випромінювання або іншого ($\tau < 10$ мкс) з переднім фронтом $\tau_{\text{п}} \sim 1$ мкс при інтенсивності вище $I_{\text{ps}} = 10^7$ - 10^8 Вт/см² (рис. 3.3). За таких умов опромінення довжина хвилі робочого випромінювання може визначатися завданнями обробки, а не її співвідношенням з поглинальними властивостями оброблюваного матеріалу [39].

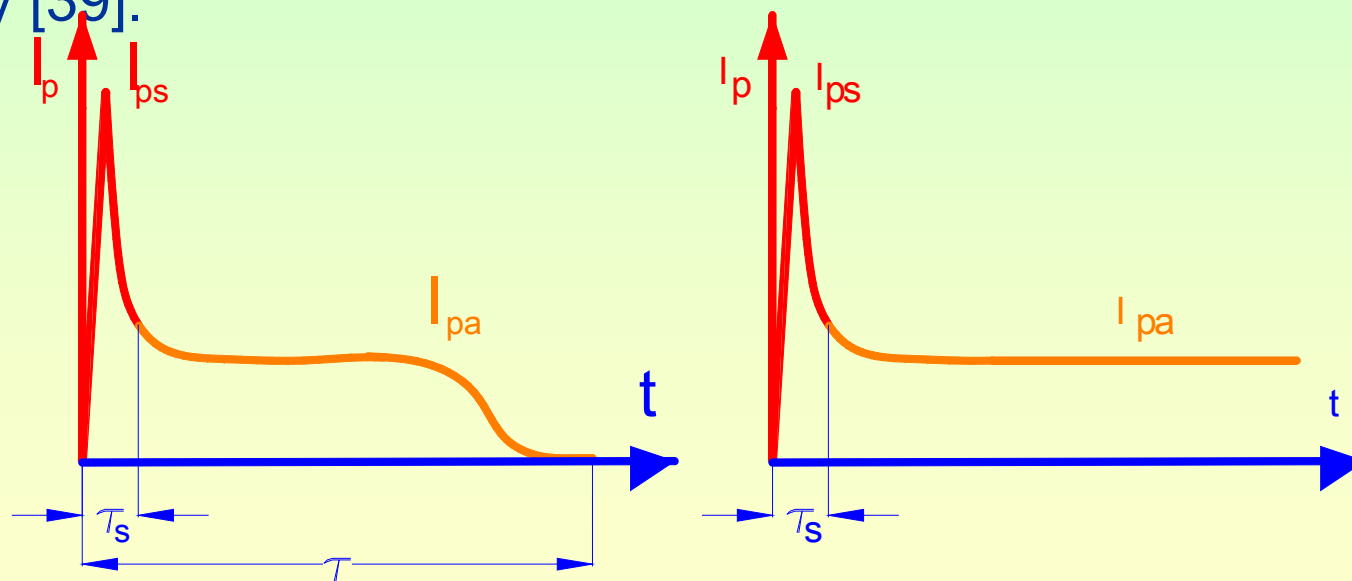


Рис.3.3. Часова структура імпульсу випромінювання (а) та безперервної генерації (б) з додатковим пічком на передньому фронті

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

а). Оптичні методи підвищення рівня поглинання

3. Технічні складнощі виділення у попередньому засобі моно імпульсу, що передує лазерній обробці, усувається за рахунок одночасного опромінення зони обробки лазерними пучками з різною довжиною хвилі випромінювання λ_1 і λ_2 (рис.3.4). У цьому випадку з'являється можливість оптичними засобами (наприклад, діхроїчним дзеркалом) поєднати на одній оптичній осі пучки випромінювання з різною довжиною хвилі: додаткового пучка, який має високе поглинання у оброблювального матеріалу і забезпечує швидкий нагрів поверхні заготовки до $T_n \sim 300-400^\circ\text{C}$, та робочого пучка випромінювання з параметрами, які визначені відповідним чином без урахування початкового значення коефіцієнта його поглинання поверхнею заготовки [40].

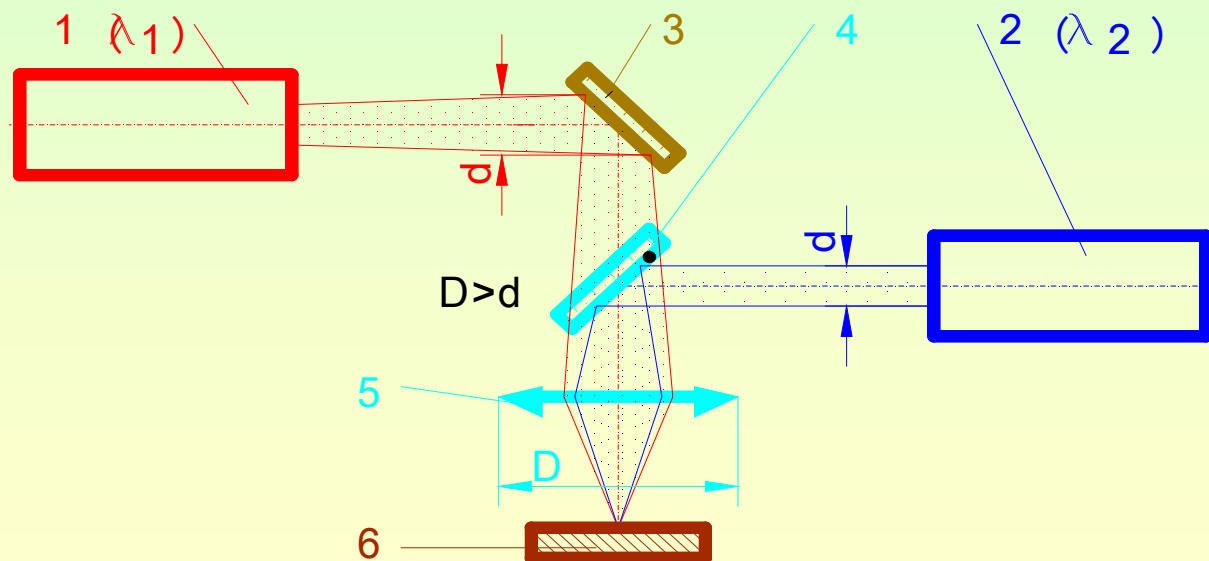


Рис. 3.4. Схема сумування пучків з різними довжинами хвиль

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготівки нанесенням додаткового шару

Нівеляція відмінностей в поглинаючих здібностях різних заготівок з однієї партії або підвищення поглинальної здатності дзеркальних поверхонь або заготівок із прозорих матеріалів може бути досягнуте при формуванні на поверхнях заготівок додаткових шарів з матеріалів, що добре поглинають випромінювання вживаної довжини хвилі. До поглинаючих покриттів можна віднести наступні вимоги:

- вони мають бути ефективними при невеликій товщині;
- матеріал покриття повинний мати високу теплопровідність, що забезпечує ефективну передачу тепла оброблюваному матеріалу;
- покриття повинне мати хороше механічне зчеплення з поверхнею заготівки, не обсипатися і не відокремлятися під час допоміжних операцій, проте легко утилізуватися після закінчення операції лазерної обробки;
- спосіб нанесення покриття має бути простим, бажано без необхідності введення додаткової технологічної операції;
- до складу покриття не повинні входити агресивні, екологічно небезпечні продукти;
- спосіб нанесення покриття повинний забезпечувати високу і стабільну міру поглинання випромінювання на всьому протязі операції.

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням додаткового шару

Відомі методи нанесення поглинального покриття на поверхню оброблюваної заготовки розрізняються механізмом створення поглинального матеріалу та формуванням шару покриття, а також необхідністю або відсутністю додаткової операції для його реалізації.

1. Для розмірного формування елементів складної поверхні (наприклад, створення регулярного мікро рельєфу на поверхнях тертя, гравірування клейма, напису, торгівельного знаку) необроблювані ділянки поверхні заготовки можна покривати шаром теплостійкої або дзеркальної фарби, використовуюваної як трафарет в технологічній операції [41]. Опромінення поверхні у режимі растрового сканування викликає видалення матеріалу на ділянках без фарби. Залишки останньою віддаляються розчинником.

2. Для заготовок з прозорих матеріалів (алмаз, сапфір, слюда), для яких неможливо або неефективно використання лазерів з відповідною довжиною хвилі випромінювання, необхідне підвищення поглинання в зоні обробки із-за їх високої прозорості для випромінювання доступних або ефективних лазерів. На поверхню заготовок з таких матеріалів наносять фарбу, чорнила, що мають високу поглинаючу здатність [42], [43]. Ця підготовка поверхні забезпечує початок операції першими імпульсами випромінювання, але за БЮ заготовок з матеріалів, що не володіють самовідновленням поглинання високого рівня при нагріві, таких як оптичне скло, кварц, акрил, необхідно повторювати процедуру нанесення покриття на поверхню дна оброблювальної порожнини, до закінчення операції.

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням **додаatkового шару**

3. Прикладом останньої операції є формування глибоких порожнин в оптичному склі. Для цього рекомендується обробка заготовки 2 через фольгу 1 з чергуванням етапів нанесення покриття і його руйнування. В цьому способі (рис. 3.5) операція починається з опромінення фольги 1 із тугоплавкого матеріалу, що розташовується над поверхнею виробу 2. Розплавлений матеріал фольги парами факелу **переноситься на поверхню виробу**, руйнує (плавить) його матеріал, утворюючи острівці спільної переплавки 3. Другий імпульс виконують через отвір у фользі, його енергія поглинається на острівцях переплавки, викликаючи руйнування матеріалу виробу і поглиблення порожнини. Для подальшого поглиблення повторюється етап I і так далі [44].

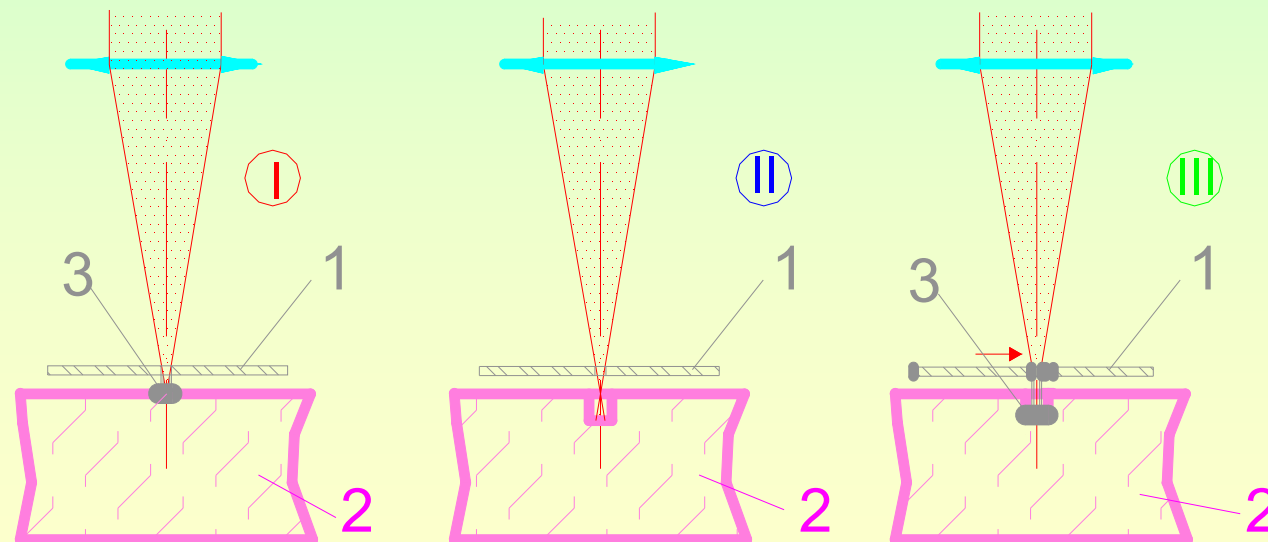


Рис. 3.5. Спосіб обробки глибоких отворів в заготівках із прозорих матеріалів

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням додаткового шару

4. Засіб для реалізації попереднього методу обробки показано на рис. 3.6.

Над заготовкою 6 розташовується фольга 3 з тугоплавкого матеріалу, яка може перемотуватися з бобіни 5 на іншу за допомогою приводу 10. Послідовність переходів наступна. Перший імпульс випромінювання, енергія якого концентрується лінзою 3 на поверхню виробу, плавить і випаровує фольгу 3, що знаходиться біля його поверхні. Частина фольги випаровується, інша складова ерозійного факелу її матеріалу вплавляється в заготовку 6, утворюючи острівці сумісного переплавлення. Енергія променя в основному витрачається на цей процес, і через тіло заготовки на фотодіод 9 через фільтр 8 попадає її незначна частина, не викликаючи спрацьовування виконавчого пристрою 4 і приводу 10 перемотування фольги 3. Наступні імпульси проходять через отвір у фользі 3, поглинаючись на острівках переплавлення і руйнуючи матеріал заготовки, формують порожнину отвору. У міру вироблення острівців переплавлення, відновлюється прозорість заготовки і рівень освітленості фотодіода 9 зростає, викликаючи спрацьовування приводу 10 і перемотування фольги на крок, більший поперек отвору, що утворився в ній. Далі переходи повторюються до формування крізного отвору, тобто коли рівень фотоструму в фотодіоді не перевищить встановленого рівня, в цьому разі лазер вимкнеться, тобто операція закінчиться [45].

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням додаткового шару

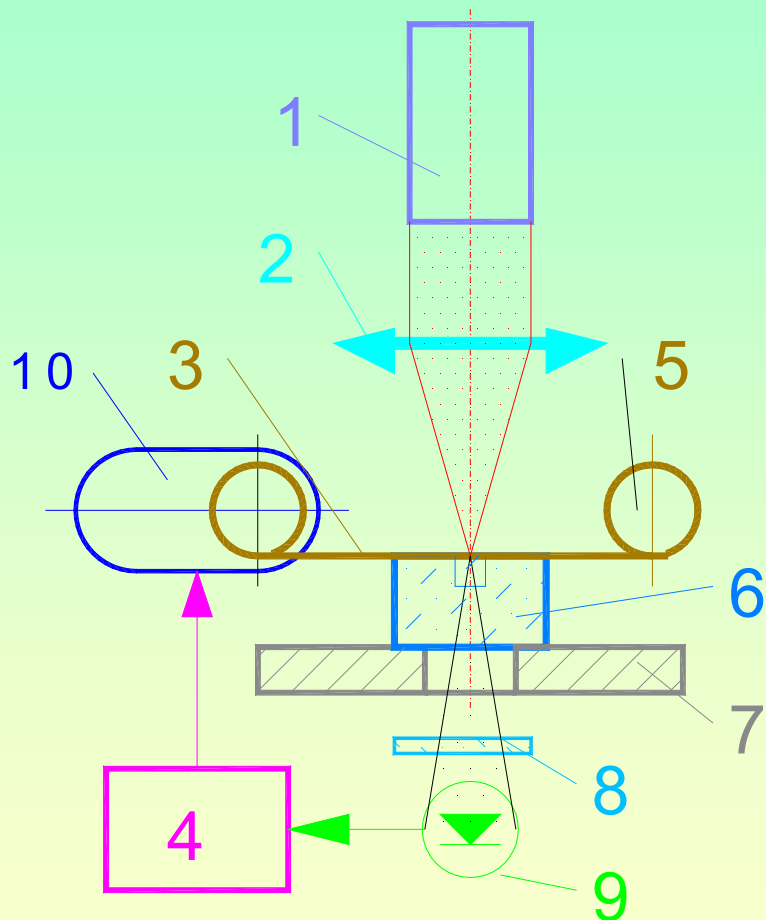


Рис.3.6.Схема ЛТУ для обробки отворів в заготовках із прозорих матеріалів

5. Методи нанесення поглинаючих покриттів змінюються залежно від вмісту операції. У масових видах обробки цей перехід автоматизують шляхом нанесення органічної плівки, що виконує поглинальні функції і захищає не оброблювальну частину поверхні заготовки від налипання розплаву з ерозійного факелу [46]. Заготовки подаються в зону обробки транспортером, минаючи пост з розпилюючим пристроєм. Завершують операцію в камері з підвищеною температурою для видалення плівки.

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням додаткового шару

6. Застосовуються також покриття у вигляді **самоклеючихся плівок** на целюлозній основі, наповнених оптимальним для використовуваного випромінювання поглиначем (SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , фосфатом марганцю, графітом і так далі). В місцях дії пучка плівка вигоряє, з останніх - легко видаляється при тязі за край [47].

7. При лазерній обробці заготовки з міді і її сплавів зону обробки ефективно покривати чорнінням шляхом розміщення заготовки у водному розчині $NaOH$, $Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$, $NaClO_2$ [48].

8. Нанесення твердих (що тверднуть) покриттів інколи замінюється розбризуванням **рідких поглинаючих середовищ** по оброблювальній поверхні заготовки (водні розчини перекису водню, **соляної кислоти**, **хлорної кислоти**, **азотно-азотисто-кислого натрію**). Це активує поверхню заготовки, покращує взаємодію випромінювання з речовиною за рахунок підвищення коефіцієнта поглинання [49].

9. **Рідкі розчини поглинаючих добавок** можна використовувати при обробці глибоких порожнин в заготовках з прозорих матеріалів при необхідності постійного відновлення поглинаючих здібностей поверхні обробки (її дна) перед кожним імпульсом. Для цього пропонується виконувати обробку пучками, сфокусованими через тіло заготовки на далеку поверхню її стінки. Можливі два варіанти обробки (рис. 3.7а та б). У першому - **заготовка 4 є дном ємкості 5**, яку заповнено суспензією поглинача (порошку графіту) в рідині (вода або рідке мастило).

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням додаткового шару

При концентрації енергії пучка випромінювання лазера **1** лінзою **2** на дальню поверхню заготовки **4** [50] поглинання відбувається по її контакту із суспензією і руйнуванням поверхні заготовки **4**. У міру створення порожнини за його дном «стежить» рівень рідини, забезпечуючи постійний контакт поглинача із заготовкою. У другому способі (б) підпор рідини створюється надлишковою висотою її стовпа H над заготовкою **4**, яку розташовано замість кришки над ємкістю **5**, сполученою з бачком **7**, в якому рідина має рівень, вищий за кінцеву глибину отвору [51].

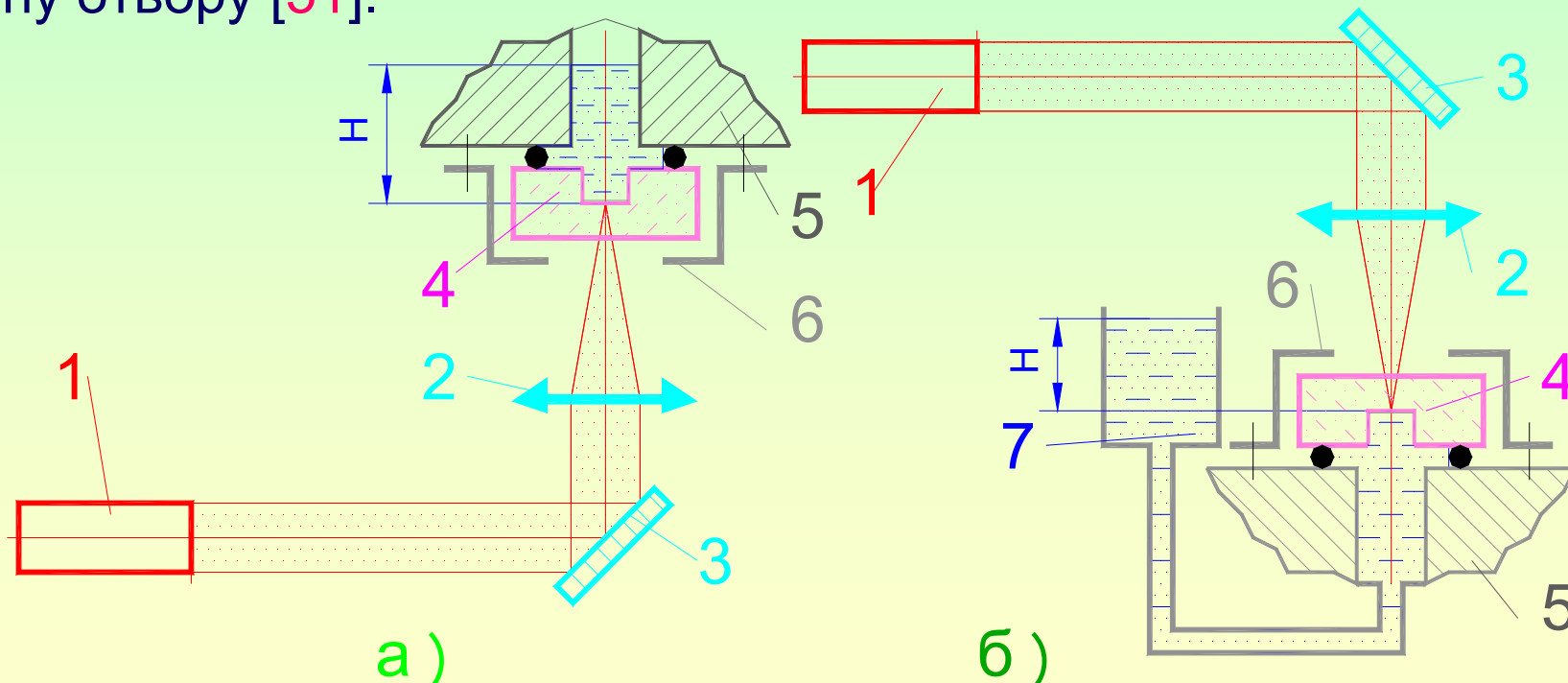


Рис. 3.7. Засоби донесення рідкої поглинальної суміші до дна оброблювальної порожнини під час обробки

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням **додаткового шару**

10. Найбільш простим за доставкою поглинача в зону обробки є засіб покриття з використанням **газових середовищ**. По-перше, деякі гази менш схильні до утворення плазми, що підвищує ефективність використання енергії лазерного випромінювання (фтор, хлор і ін.) [52]. По-друге, гази можуть транспортувати поглинаючі порошинки поза траєкторією пучка лазерного випромінювання, що не заважає доставці енергії останнього. Для транспортування і осадження часток в технологічній операції застосовують додаткові до зони обробки пости, де здійснюється покриття виробу частками. Так, відповідно до [53] **заготівка 1** (рис.3.7) на шляху до місця обробки **III** проходить між електродами **коронного розрядника 3**, де, електризуючись, і потрапляючи на другу позицію **II** із зваженою **газовою сажею 4**, покривається по всій поверхні. Після гравірування малюнка лазерним променем за допомогою сканерів **5, 6** виріб направляють на позицію **I** в електричне поле протилежної полярності, що викликає **осипання «зайвого» покриття**, яке придбало заряд від контакту з виробом.

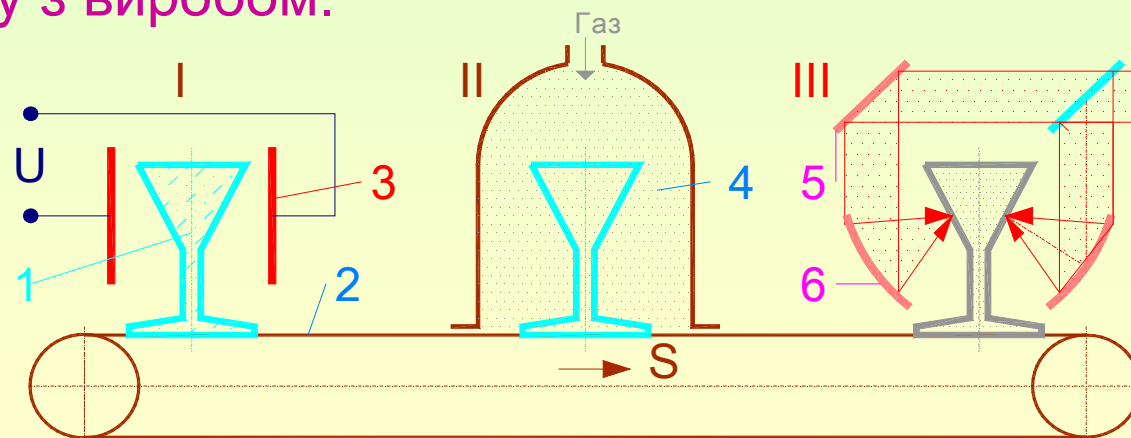


Рис. 3.8. Схема засобу нанесення газової сажі на поверхню заготовки

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням додаткового шару

11. Газы, що містять вуглець (бутан, пропан або метан), можуть доносити сажу у зону обробки, виділяючи її при контакті з холодною поверхнею заготовки (рис.3.9). Для цього необхідно в додатковому соплі 5 (за межами променя 1) спалювати газ (а) в режимі недостатчі кисню (коефіцієнт надлишку окислювача $\alpha \ll 1$), що викликає його неповне згорання і розкладання з виділенням газової сажі при раптовому охолодженні [54]. Такий режим горіння газу досягається підмішуванням інертних добавок до нього, або організацією спеціального режиму обдування поверхні полум'ям, який організується підбором витрати газу, його тиску і відстані до холодної поверхні.

Подібного ефекту можна добитися при неокислювальному нагріві газу (б) до $T > 550^\circ\text{C}$ і його розкладанні на компоненти (легкі і важкі складові, наприклад, для метану $\text{CH}_4 = \text{C} + 2\text{H}_2$) додатковим джерелом, наприклад, електричною спіраллю 5, яку розміщено в зовнішньому конусі різачка 4 [55].

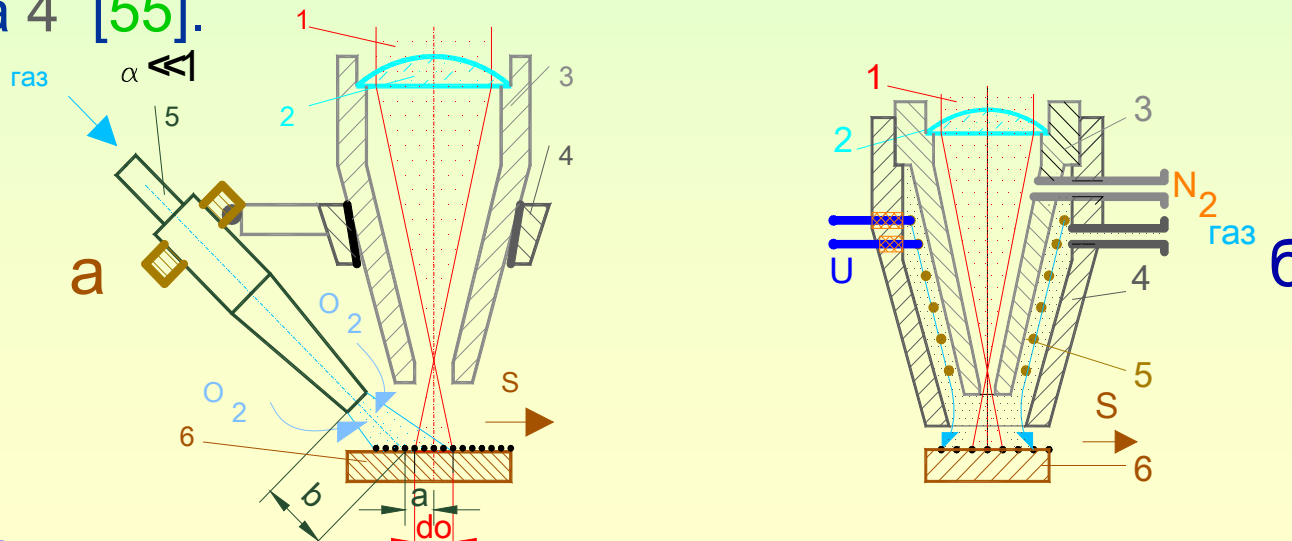


Рис.3.9.Схема ЛТУ з пристроєм для нанесення поглинального покриття із вуглеводнів

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

б). Засоби підвищення поглинання поверхнею заготовки нанесенням додаткового шару

Слабо поглинаючі матеріали можуть бути зруйновані теплом, що виділяється в матеріалі покриття, що добре поглинає лазерне випромінювання і що має достатню теплоємність і температуру випари, що перевищує температуру руйнування матеріалу заготовки [56]. Необхідно підкреслити, що в останньому випадку потрібна хороша теплопровідність покриття і його ідеальний тепловий контакт з основним матеріалом, що, втім, повинно бути властиво в деякій мірі і останнім методам обробки з покриттям.

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

Для підвищення ефективності технологічною операцій необхідно мінімізувати втрати теплової енергії впродовж операції, а також оптимізувати механізм теплового руйнування матеріалу заготовки. Поступове зниження ефективності, що особливо спостерігається під час обробки глибокої порожнини, пов'язане із зсувом дна порожнини з розрахункового перетину каустики сфокусованого пучка, а також із збільшенням при цьому долі поглиненої частини променистої енергії на продуктах руйнування. Усунення таких втрат може бути досягнуте відповідною організацією процедури опромінення, виключенням або послабленням впливу факелу і за рахунок застосування додаткових енергетичних дій в процесі обробки.

1. Підвищення ККД обробки металів і сплавів при їх опроміненні довгохвильовими пучками випромінювання ($\lambda = 10,6$ мкм) забезпечується за особливих умов опромінення заготовки, пов'язаних із зменшенням інтенсивності факелу на шляху пучка випромінювання. Суть способу обробки полягає в тому, що поверхня заготовки розташовується вище перетяжки каустики сфокусованого пучка на відстані a від неї ($k = 0,1-0,2$ - коефіцієнт; d_0 - діаметр перетяжки, γ - кут половини конуса каустики сфокусованого пучка ($\gamma = \arctg D/2F$, де D - діаметр променя на лінзі, F - її фокусна відстань)). Позитивний ефект засновано на явищі існування зворотної ударної хвилі внаслідок виникнення в області високої інтенсивності променя плазми (при «гострому» фокусуванні), рухомої назустріч останньому з швидкістю $\sim 10^4$ м/с.

$$a = kd_0 / 2tg\gamma$$

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

За запропонованими умовами опромінення найбільш щільні згустки плазми зміщуються в область зниженої інтенсивності випромінювання, через що зменшується поглинання в ударних хвилях. Внаслідок цього автором наголошується підвищення ефективності обробки до 60% в порівнянні з «гострим» фокусуванням пучка на поверхню заготовки [57].

2. Для виключення факелу з балансу поглиненої енергії при обробці заготовок з матеріалів, прозорих для лазерного випромінювання, рекомендується виконувати обробку, починаючи з тильної поверхні заготовки (відносно пучка випромінювання). Початкове поглинання виникає на поверхні контакту заготовки 1 з поверхнею столика 2 (рис. 3.10). У міру поглиблення порожнини зона контакту його дна зміщується з поверхні столика, тому за цим способом можна обробляти лише ті матеріали, що підтримують високий рівень поглинання при тепловій дії, наприклад – за рахунок почорніння (графітизації) поверхні алмазу при його нагріві [50].

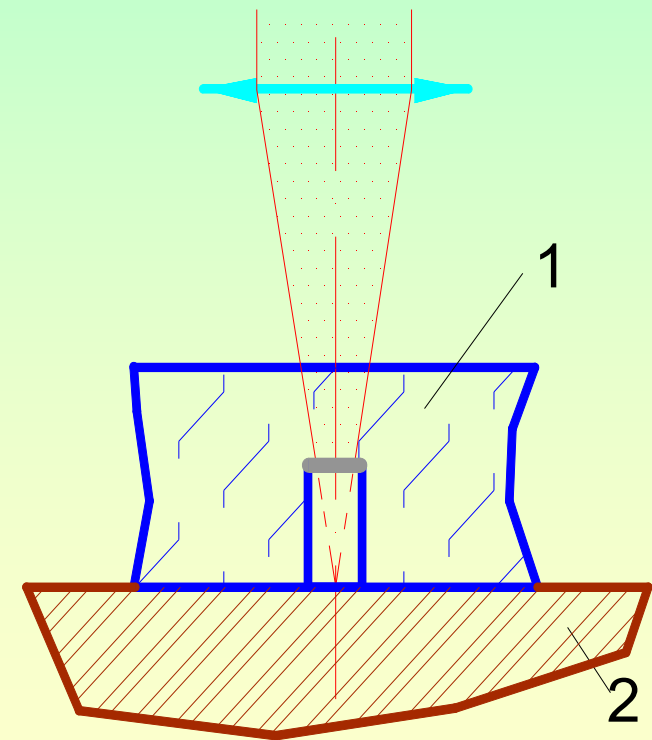


Рис. 3.10. Схема опромінення заготовки із прозорого матеріалу, який внаслідок нагріву підвищує коефіцієнт поглинання

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

3. Подовжня форма каустики сфокусованого пучка лазерного випромінювання (гіперболоїд обертання) сприяє зміні ефективності протягом операції розмірної обробки порожнини із-за зміни інтенсивності випромінювання в зоні дії пучка (на дні останньої). Найбільша ефективність, вочевидь, може бути досягнута при збереженні постійної «гостроти» фокусування на поверхні руйнування матеріалу (дні порожнини). Для цього можна періодично (в перервах між імпульсами) зміщувати заготовку назустріч пучку лазерного випромінювання, або підтримувати умови опромінення періодичною заміною лінз. На рис. 3.11 показана схема трансфокатора, що має конструкцію поворотної турелі 4 із зміщеними на периферії лінзами 2...3, фокусні відстані яких відрізняються на величину приросту глибини порожнини одним імпульсом. Із схеми видно, що для реалізації такої схеми обробки пристрій містить діафрагми 5 біля кожної лінзи, розмір яких зменшується з ростом фокусної відстані лінзи для стискування пучка 1 до розміру апертури вхідної ділянки оброблюваного отвору, що б усунути екранування пучка на вході в порожнину та її руйнування. На початковому етапі обробки використовується лінза F_1 , з апертурою діафрагми D_1 , при поглибленні отвору на величину Δh_1 застосовують наступну лінзу 3 $F_2 = F_1 + \Delta h_1$ з діафрагмою, розмір якої визначається із співвідношення:

$$D_i = F_i \cdot \frac{d}{2 \cdot \Delta h_{i-1}}$$

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

де: d - розмір оброблювальної порожнини.

Обмеження розміру пучка випромінювання супроводжується **зниженням рівня енергії**, що досягає заготовки **7**. З метою підтримання початкового (розрахункового) рівня інтенсивності в зоні опромінення треба **одночасно збільшувати імпульсну енергію в не діафрагмованому пучку 1**, що потребує зміни умов збудження лазера.

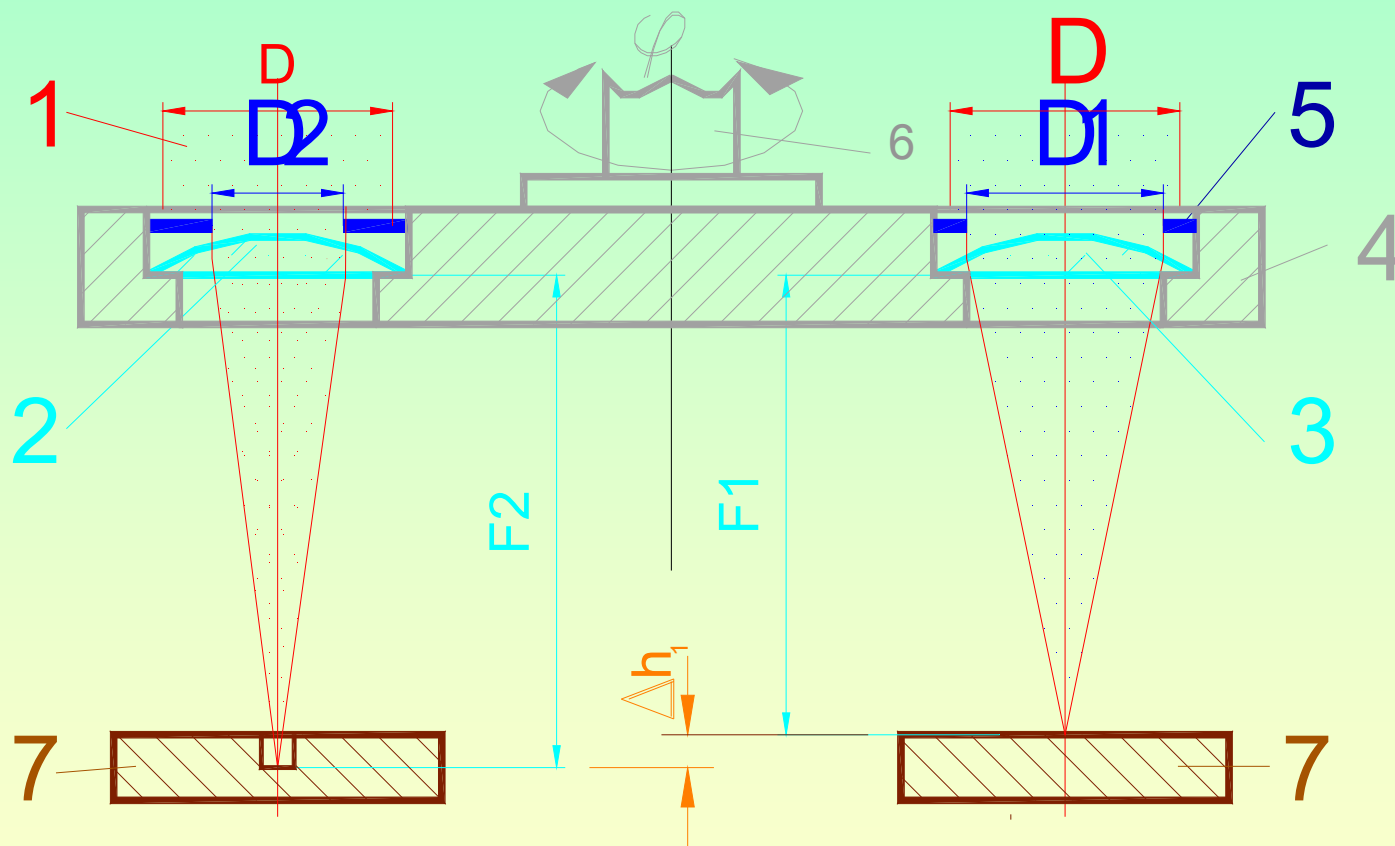


Рис. 3.11. Схема обробки порожнини з використанням системи лінз (трансфокатора)

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

4. В попередній схемі набір лінз в корпусі трансфокатору залежить від величини збільшення глибини порожнини кожним імпульсом, тому, по-перше, дискретність фокусних відстаней буде змінною, а, по-друге, для іншого режиму обробки буде необхідний новий набір лінз. Усунення цих недоліків, а також зв'язаних з нерівномірністю приросту фокусної відстані лінз, що чергуються, досягається використанням трансфокатора з плавною зміною значення фокусної відстані. Його основу складає лінза, яка має можливість змінювати кутове положення відносно осі променя – від нормального положення головної її площини до похилого. При нахилі лінзи також нахилляється її фокальна площина і пересікає вісь променя (і оброблювальної порожнини) нижче, ніж менш похилий, тобто відбувається збільшення робочого відрізка каустики і її звуження (рис. 3.12). Так, нахилляючи лінзу 2 з фокусною відстанню F на кут φ , зміщуємо положення перетяжки каустики (у геометричному розгляді) на величину Δh :

$$\Delta h = F(1/\cos\varphi - 1)$$

Порівнюючи поточний приріст глибини отвору Δh_i з фактичним положенням каустики, визначають потрібний нахил лінзи φ для зміщення каустики і підтриманні постійних умов опромінення. Для усунення аберації (кома і астигматизм) необхідно обертати лінзу відносно осі пучка лазерного випромінювання з кутовою швидкістю (τ – тривалість імпульсу випромінювання). Зручним виявляється керований нахил лінзи за рахунок відцентрових сил при розташуванні деякої маси на її периферії. Кут φ залежатиме від місця розташування дисбалансу і швидкості обертання лінзи (ω) [58]. На рис.3.13 зображено приклад конструкції.

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

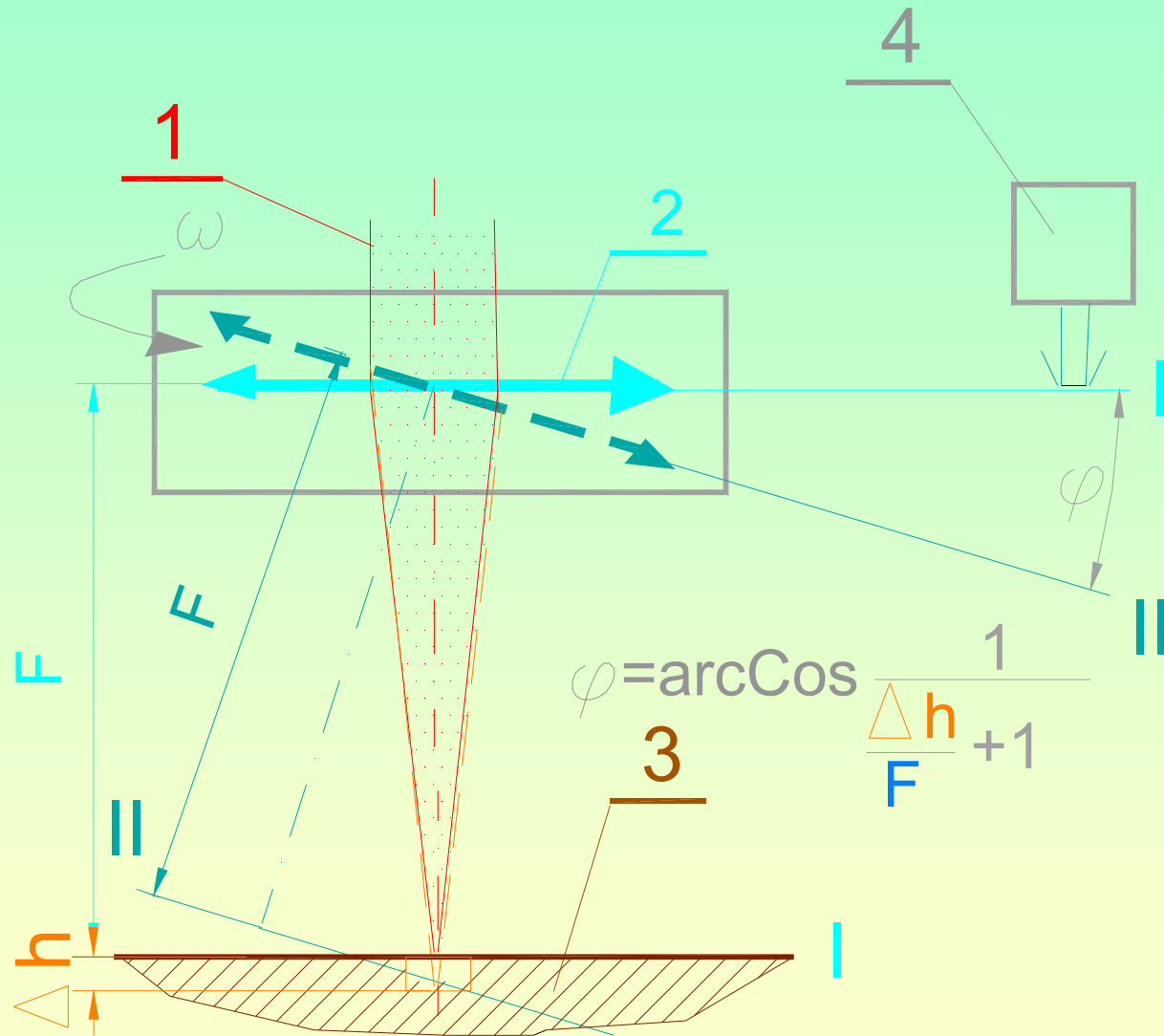


Рис. 3.12. Схема обробки порожнини з використанням трансфокатора з похилою лінзою

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

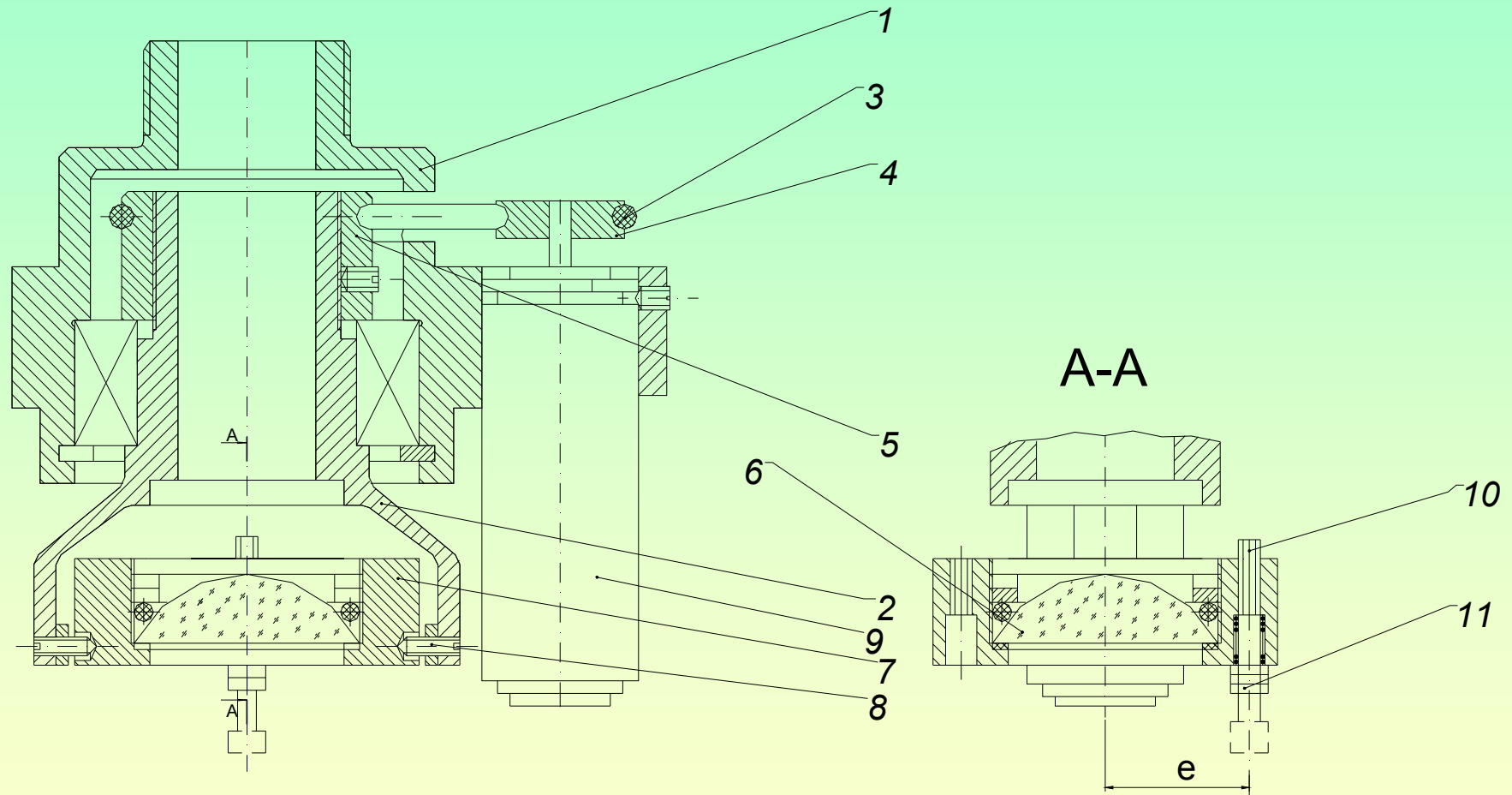


Рис. 3.13. Конструкція трансформатора з єдиним приводом обертання та нахилу лінзи

Використання одного приводу обмежує варіантність швидкості ω та кута φ , тому для розв'язування цієї залежності є конструкція з двома приводами 29 (рис.3.14).

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

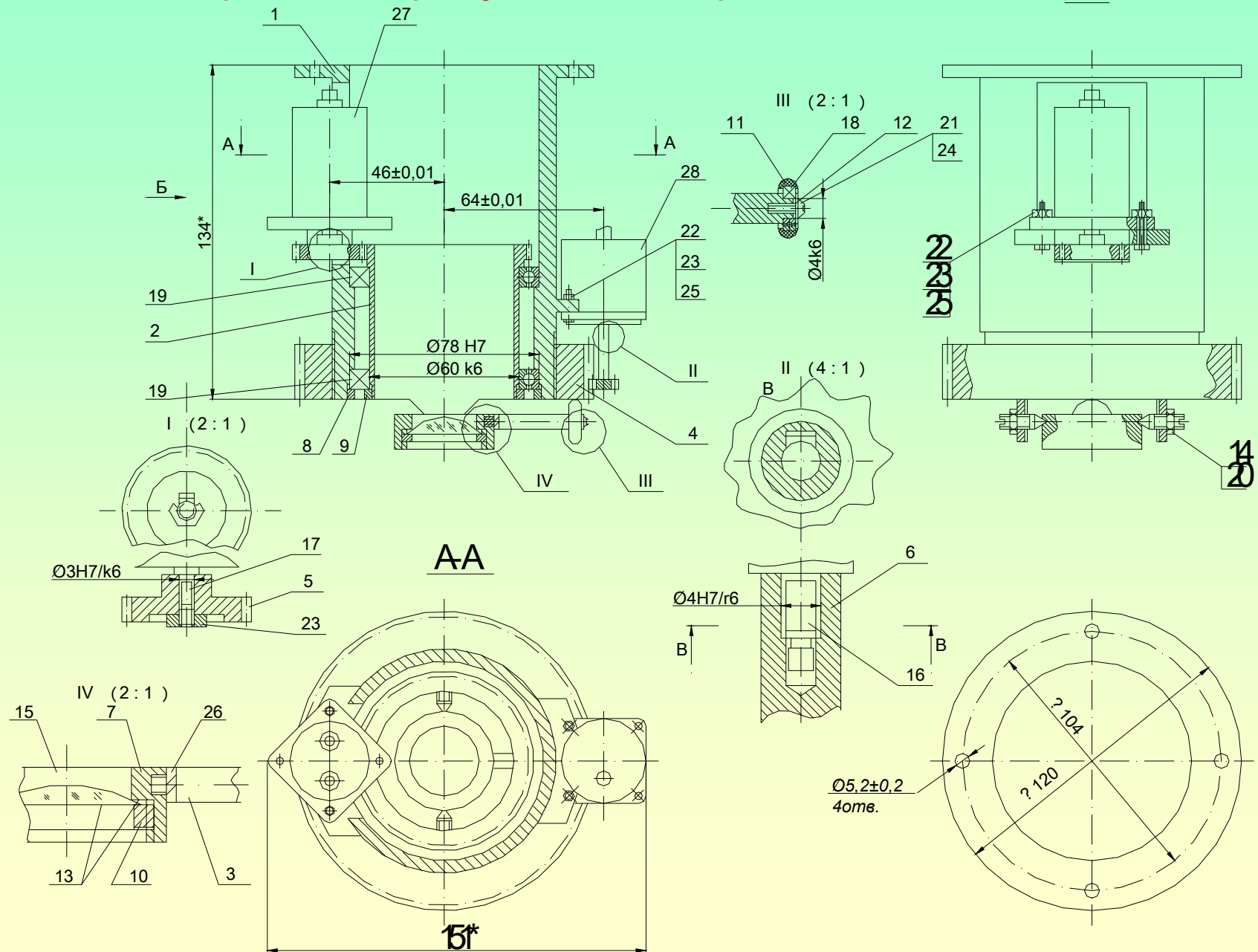


Рис. 3.14. Конструкція трансформатору на похилій лінзі з двома приводами

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

5. Попереднє завдання безперервного “стеження” визначеним перетином **каустики** лазерного променя за положенням поверхні руйнування оброблювального елемента (отвору, пазу, щілини) може бути вирішено шляхом **хвильового перетворення лазерного випромінювання**. Хоча цей метод в даний час технічно важко реалізується, при розвитку лазерної техніки можливе використання явища дисперсії світла для підтримання початкових умов опромінення. Але **умовна монохроматичність** лазерних променів дає можливість використовувати явище **дисперсії світла** (залежність його швидкості від довжини хвилі випромінювання) та **наявність деякої ширини спектру генерації** (теоретично $\Delta\lambda \approx 10^{-8} \div 10^{-9}$ Гц, але в дійсності набагато більше), яка завдячує явищу розширення енергетичних рівнів за декількома чинниками і дорівнює ширині спектру люмінесценції активного середовища, дозволяють в малому інтервалі **керувати фокусною відстані f** робочого об'єктиву [59]. Обробку отворів в цьому режимі опромінення виконується в наступній послідовності.

Заготовка із алюмінію товщиною 2 мм розташовується на відстані 150 мм від об'єктиву, що дорівнює його фокусній відстані f для довжині хвилі $\lambda_1 = 1080$ нм. Включають лазер ЛТУ (рис.3.15а) Лампа накачки протягом $\tau_H = 2,5 - 3$ мс, переводить активне середовище 5 у збуджений стан та через 0,5 мс (час досягнення інверсної заселеності в ньому до значення порогу) від її спалаху із синтезатору частот надходить на п'єзо перетворювач 8 сигнал с частотою $\nu = 30$ МГц. Це утворює акустичну решітку в дефлекторі 8 і лазер випромінює **перший пічок на довжині хвилі $\lambda_1 = 1080$ нм**, що при енергії в пічку 0,05 Дж створює **інтенсивність в зоні опромінення $I_p = 5 \cdot 10^8$ Вт/см²** при його перетворенні лінзою. Поріг руйнування алюмінію перевищується, що призводить до його випаровування з утворюванням лунки глибиною $h \approx 0,1$ мм в заготовці 4 (рис.3.16). Можливе виділення із променя його складових дисперсним елементом резонатору (рис.3.15б).

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

Через період часу $t = 30$ мкс ($t \in 10-100$ мкс) після першого пічку програмний пристрій 8 збільшує частоту сигналу синтезатору 4 на 0,5 МГц, що приводить до зменшення довжини хвилі випромінювання в другому пічку на 0,5 нм ($\lambda_2 = 1080 - 0,5 = 1079,5$ нм). Внаслідок того, що лінза Френеля 2 має позитивну хроматичну аберацію, то зменшення λ_1 на $\Delta\lambda = 0,5$ нм у відповідності до залежності $\Delta f = \Delta\lambda f / \lambda_0$ (f - фокусна відстань об'єктиву, λ_0 - середня довжина хвилі із спектру генерації) збільшує фокусну відстань f на 0,075 мм і другий пічок випромінювання концентрувався на відстані 150 мм + 0,075 мм, тобто точка обробки опускалася в глибину матеріалу на 0,075 мм і промінь практично концентрувався на дні утвореної першим пічком лунки (рис.3.16). Якби далі перебудову довжини хвилі проводили лінійно, то за 30 пічков випромінювання довжина хвилі змінилася б від 1080 до 1065 нм, а точка концентрації променя опустилася б в глибину матеріалу заготовки на 2 мм. Але при цьому переміщення точки концентрації не було би зв'язано із дійсним темпом утворення лунки і отвір за один імпульс не було би утворено. Це пов'язано з тим, що по мірі просунення випромінювання вглиб матеріалу, заглиблення лунки від діяння кожного наступного пічка зменшувалося внаслідок екранування променя вхідною крайкою отвору. Якщо закон змінення глибини лунки визначити експериментально, та у відповідності до нього змінювати частоту акустичної хвилі за допомогою програмного пристрою керування синтезатором то це дозволить зменшити енерговитрати, збільшити швидкість обробки та глибину отвору.

6. Більші можливості перебудови променя мають лазери на вільних електронах (ЛВЕ), у яких довжина хвилі випромінювання може бути змінена впливом на параметри ондулятора (джерела магнітного поля, в якому рухаються вільні електрони). Змінюючи довжину хвилі можна досягти плавного зсуву горловини каустики сфокусованого пучка в тілі заготовки 4 [60].

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

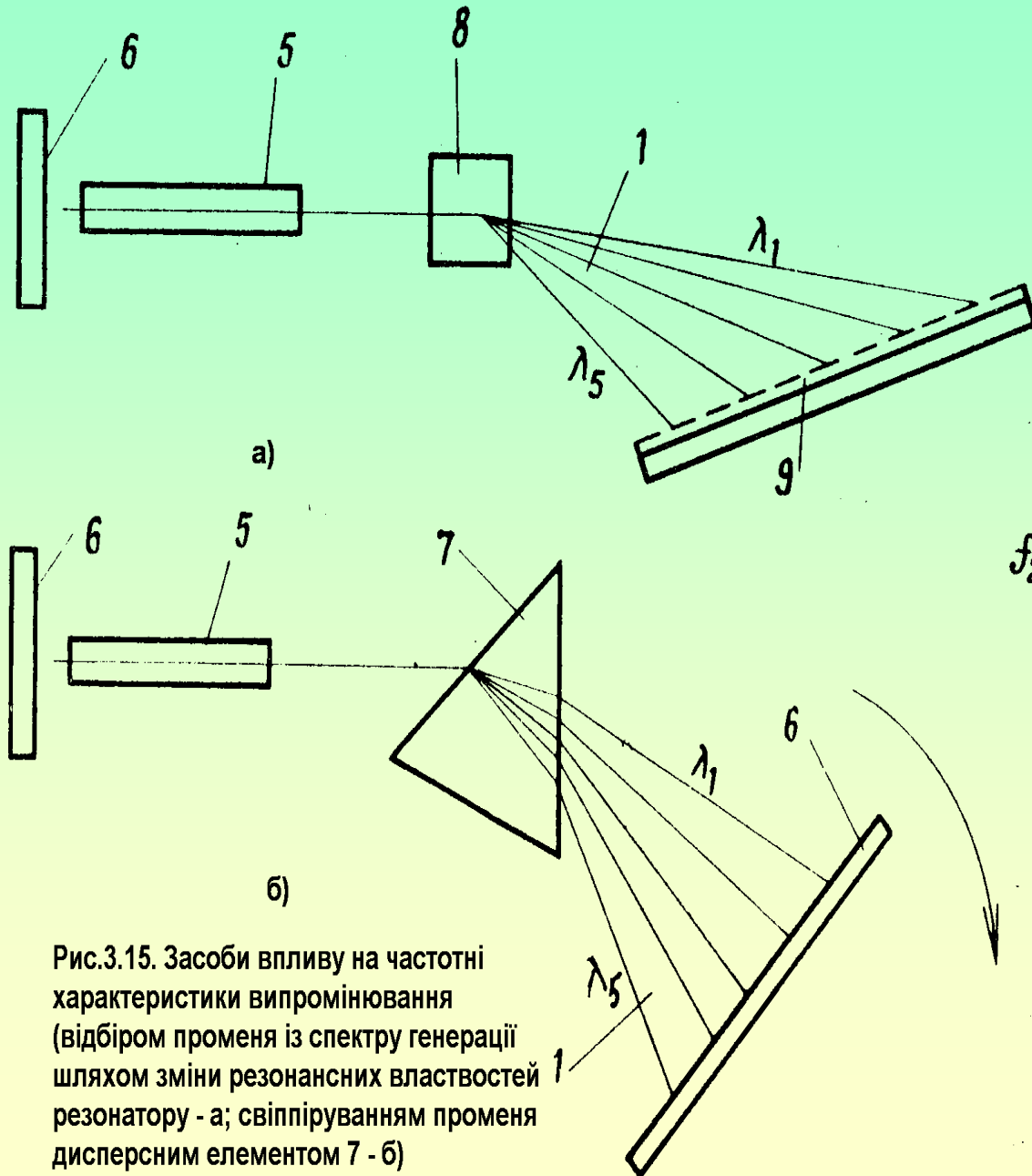


Рис.3.15. Засоби впливу на частотні характеристики випромінювання (відбором променя із спектру генерації шляхом зміни резонансних властивостей резонатору - а; свіпнуванням променя дисперсним елементом 7 - б)

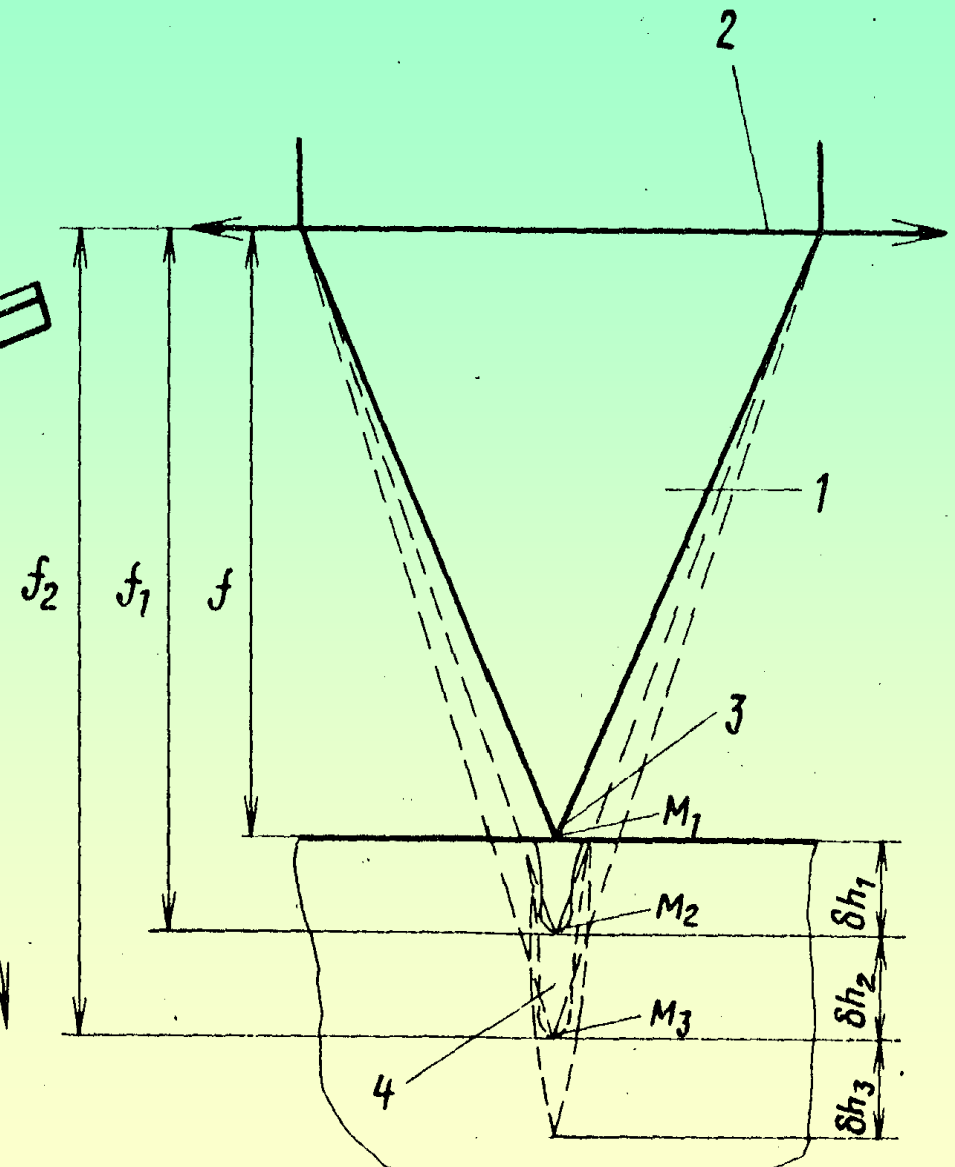


Рис.3.16. Схема змінення умов опромінення впливом на довжину хвилі променя

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

7. Але на даному етапі розвитку лазерної техніки на практиці частіше використовується вплив на хвильові характеристики лазерного променя параметричним перетворенням (множення) його частоти, що дозволяє однією і тією ж оптичною системою концентрувати енергію основного випромінювання і його вищих гармонік вздовж деякої області каустики у глибину оброблювальної досягається, наприклад, для випромінювання лазерів на YAG: шляхом установки на його шляху кристала з нелінійними характеристиками, що зміщує випромінювання у видиму ($\lambda=0,530$) та ультрафіолетову ($\lambda=0,355$ та $0,265$ мкм) області спектру [61].

Викладений вище спосіб реалізовано компанією LPKF в ЛТУ MicroLine Drill [62]. В якості джерела випромінювання в ЛТУ MicroLine Drill використано YAG:Nd³⁺-лазер, який працює на 3-ій гармоніці ($\lambda = 0,355$ мкм) (рис.3.17 та 3.18).



Рис.3.17. ЛТУ для обробки отворів в друкованих платах

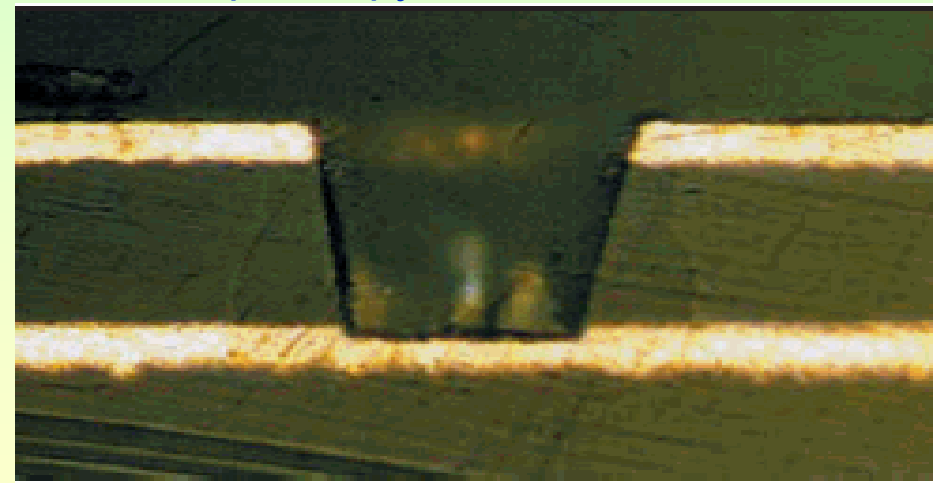


Рис. 3.18. Приклад перехідного отвору в друкованій платі

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

8. Для підтримування майже постійного рівня інтенсивності випромінювання на поверхні елементу заготовки, що обробляється, можна також компенсувати “потовщення” каустики у міру зсуву дна лунки з початкового її перетину збільшенням енергетичної складової характеристики випромінювання (енергії або потужності). Для управління законом її зміни можуть застосовуватися статистичні моделі процесу росту глибини лунки, аналіз інтенсивності (яскравості, щільності, ступеню іонізації, висоти, шуму і ін.) ерозійного факела від імпульсу до імпульсу з підтриманням обраного показника на належному рівні [63]. На рис.3.19 зображено ЛТУ з контролем факела 14 променем 6 додаткового лазера 5 та системою змінення умов опромінення (12-процесор, 8-9 - фотодатчик, 10 – привод пневматичного клапану 13, 11 – блок живлення лазера 1, 4 – заготовка) в залежності від результатів виміру.

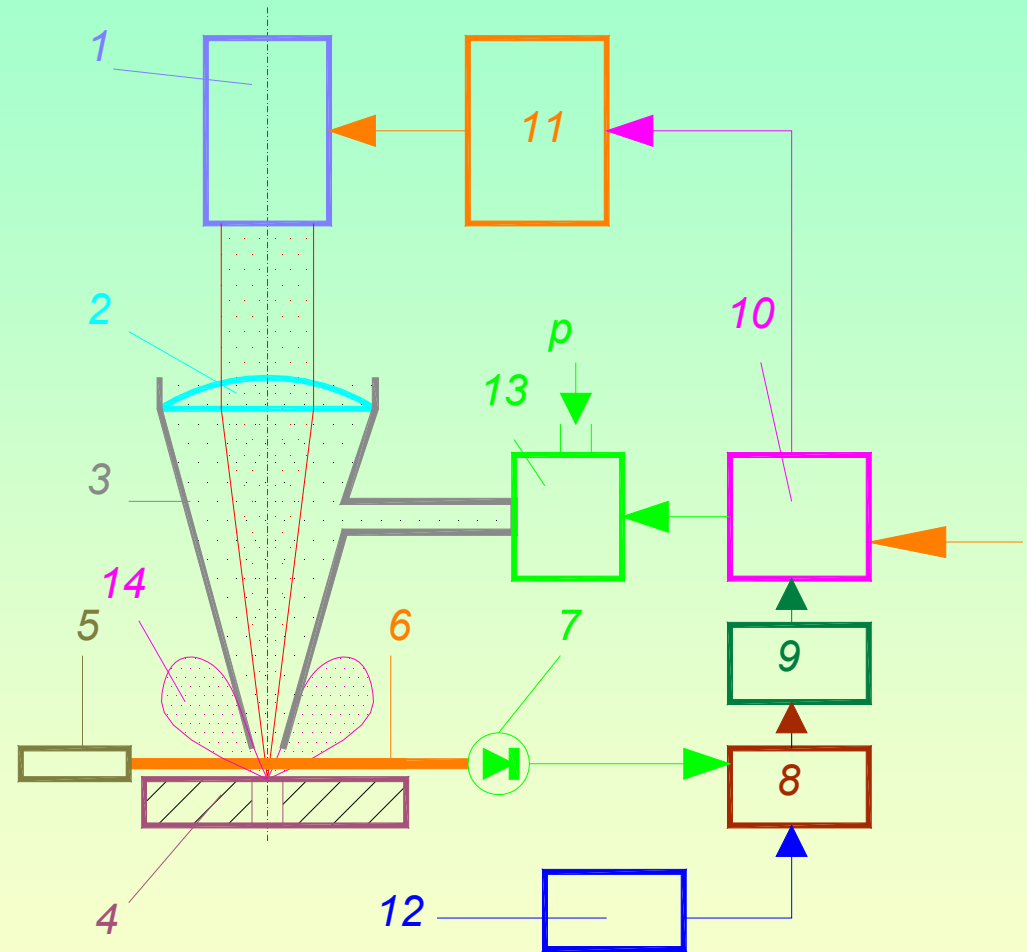


Рис. 3.19. Схема обробки з контролем характеристик ерозійного факела

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

9. В разі одно імпульсної обробки масової кількості отворів в ситах, ґратах і інших виробках можна організувати усунення факелу, що утрудняє процес опромінення, шляхом деякого відхиленні осі променя від нормалі до поверхні заготовки. Перпендикулярне розташування факела (по відношенню до поверхні заготовки) гарантує усунення його дії на процес обробки за умови $\delta > (\gamma + \varphi_{\phi}) / 2$ (рис.3.20) [63].

10. В деяких випадках підвищення ефективності процесу ЛРО порожнин спостерігається при поєднанні дії лазерного випромінювання з іншими електрофізичними методами обробки (ЕЕО, ЕХРО, УЗО). Так, УЗ-коливання заготовки при її обробці уздовж осі пучка випромінювання сприяє інтенсивнішому видаленню розплаву з порожнини, різку, що рівнозначно підвищенню швидкості знімання матеріалу. При формуванні отворів у листовій заготовці збудження в останній ультразвукових хвиль тим або іншим способом так само впливає на процес обробки, підвищуючи її ефективність. Зручно поєднувати введення енергії УЗ-коливань через конус захисного сопла (різака) ЛТУ [64] (рис.3.21).

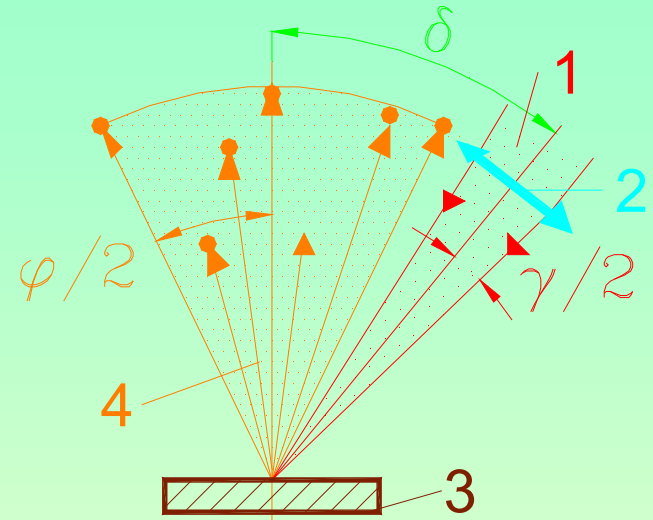


Рис.3.20. Схема опромінення без завади факелу

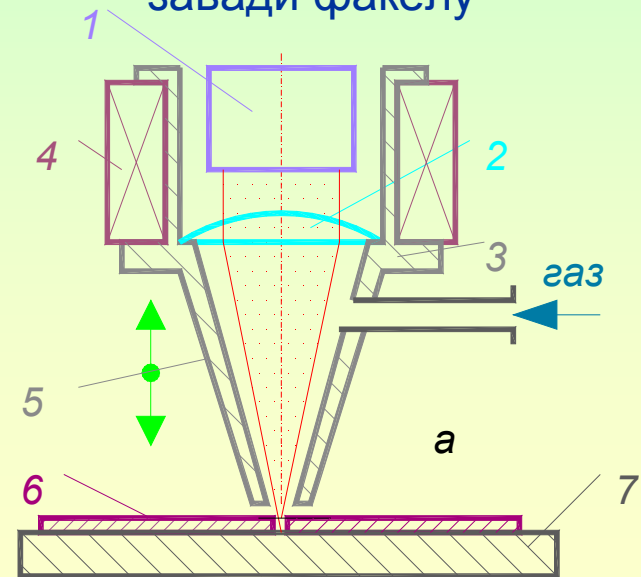


Рис. 3.21. ЛТУ для операції лазерної та УЗ обробки

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

11. Підвищення сумарної продуктивності процесу обробки порожнини досягається при повнішому об'ємі використання можливостей пучка лазерного випромінювання. Це спостерігається в операції прошивки отворів в платах друкарського монтажу, що вимагають подальшої металізації внутрішньої поверхні. Поєднання прошивки отворів з металізацією практично не вимагає додаткових витрат енергії, якщо заготовку 4 розташувати на поверхні масивної підкладки 5, виготовленої з матеріалу, що металізує поверхню (мідь, срібло і ін.). Імпульс, що завершує формування крізного отвору, формує також плазмову хмару з поверхні підкладки 5, що осідає усередині поверхні отвору 8. Ефективність використання факела 7 може бути збільшена при покритті отвору 8 у цей момент прозорою пластиною 6 (рис.3.22) [65]. Це дозволяє використати в більшому об'ємі склад факелу 7.

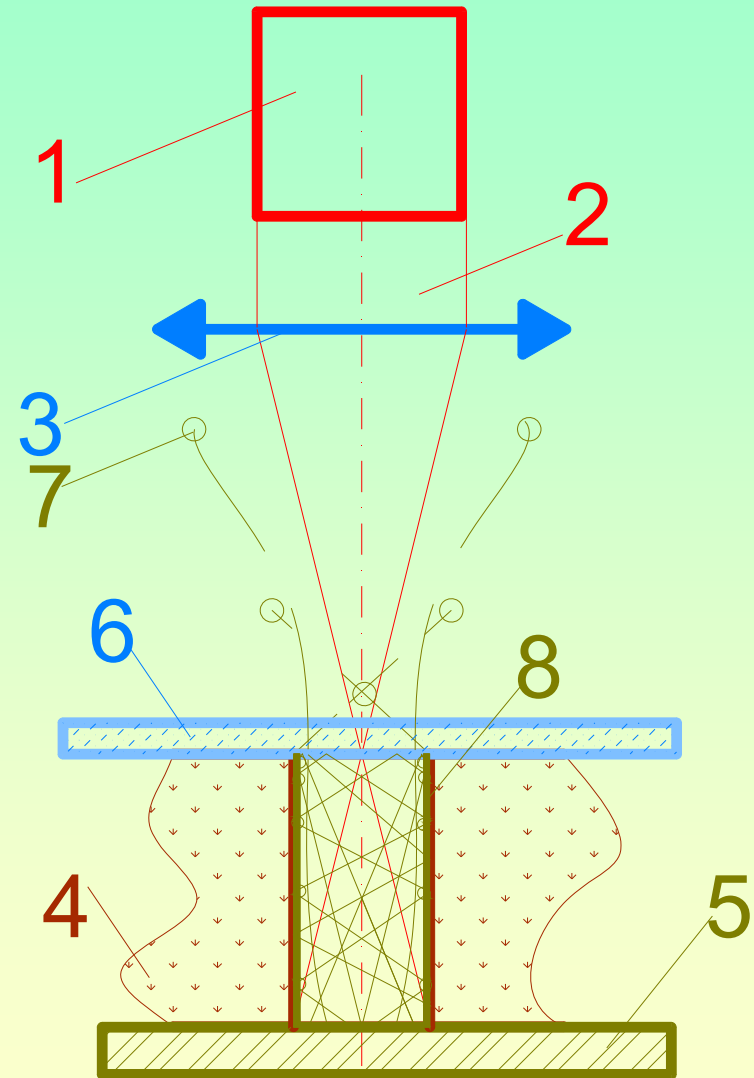


Рис. 3.22. ЛТУ для операції пробиття отворів та їх металізації

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

12. При обробці глибокої порожнини циліндричної форми, коли на завершуючій стадії вхідна її ділянка істотно діафрагує пучок та руйнується, створюючи **конічну частину**, рекомендується, якщо це технічно здійснено, виконувати обробку **з двох сторін заготовки**, опромінюючи їх одночасно або послідовно. **Осесиметричні заготовки 1** при ретельному виготовленні оснащення (мінімальному терті в опорах 2 - 3) можна обробляти з автоматичним вибором і зміною сторони заготовки, що опромінюється, поставивши це в залежність від дійсної глибини лунки з тією або іншою її сторони. Для цього необхідно заготовку **1** встановити з можливістю **вільного обертання відносно осі симетрії** перпендикулярно пучку лазерного випромінювання (рис. 3.23, де 2 – додаткові елементи кріплення і обертання **заготовки 1** в підшипниках 3, 4 - лінза). Починаючи обробку з будь - якого положення заготовки **1** подачею декількох імпульсів, заглиблюють оброблювальну порожнину (а), поки крутячий момент від ваги заготовки **G**, яку прикладено до зміщеного центру тяжіння **e** ($M_{кр} = Ge$) не переверне її до нового стійкого положення,

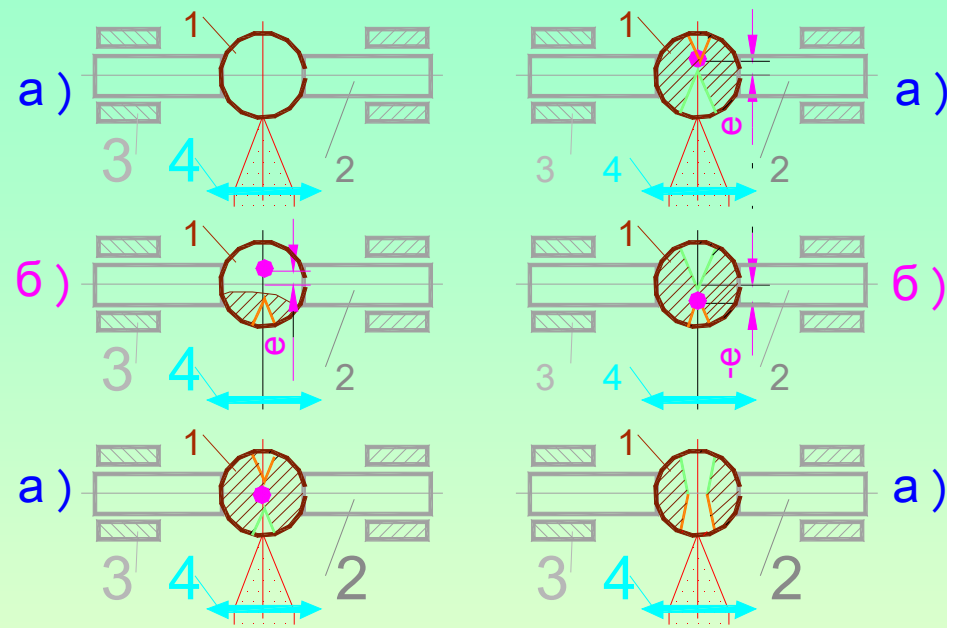


Рис.3.23. Схема обробки обвору з двох сторін з автоматичним вибором напрямку обробки

відповідного обробці порожнини з протилежного боку (б). При досить тривалих операціях (в разі глибокої порожнини) заготовка може зробити **декілька «перекидів»**, оптимізуючи напрям поглиблення отвору. Для унеможливлення пошкодження заготовки у момент її обертання, необхідно передбачити датчик руху, що забороняє обробку під час "перекиду" [66].

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

13. При обробці простих за формою заготовок (кулька, циліндр, конус і інші) можна також оптимізувати процес обробки за її тривалістю, забезпечуючи безперервне автоматичне стеження визначеною площиною каустики за положенням поверхні руйнування оброблювального елемента (дна порожнини). Для цього заготовку поміщають в конічну (або складнішої подовжньої форми) трубку, що розширюється назустріч пучку випромінювання і розташовану вертикально, в яку знизу подають під тиском газ (повітря), що зважує заготовку на рівні, визначуваному розмірами порожнини, масою заготовки і тиском газу (рис. 3.24). У міру видалення матеріалу з порожнини початковими імпульсами лазерного випромінювання заготовка зменшує свою вагу і переміщається внаслідок цього на величину, визначену передавальним коефіцієнтом пневматичної системи, тобто формою трубки, підтримуючи початкові умови фокусування [57].

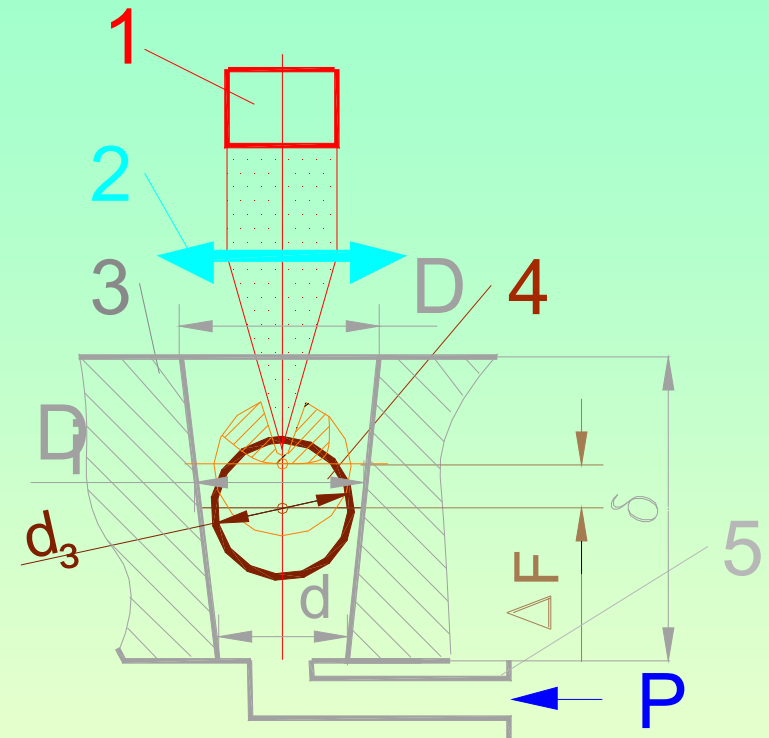


Рис.3.24.Схема обробки отворів у заготовці (рис. 3.24).
гостра форми (уя, циліндр та ін)

3.1. Підвищення ефективності ТО ЛРО порожнин

3.1.2. Оптимізація використання енергії теплового джерела створеного в результаті опромінення заготовки

Інколи рішення задачі підвищення ефективності операції обробки порожнини знаходиться на неочевидному шляху її реалізації. Так, ремонт порожнин, наприклад, в філь'єрах з твердого сплаву 5 або діамантових волоках шляхом збільшення їх розміру до найближчого більшого з нормалізованого ряду розмірів, може виконуватися меншим числом імпульсів і меншого рівня енергії, якщо перед обробкою в порожнину запресовувати порошковий матеріал 7, подібний оброблювальному, що включає в процес обробки механізм теплопровідності, який важко реалізується при фокусуванні пучка всередину порожнини 6 [68].

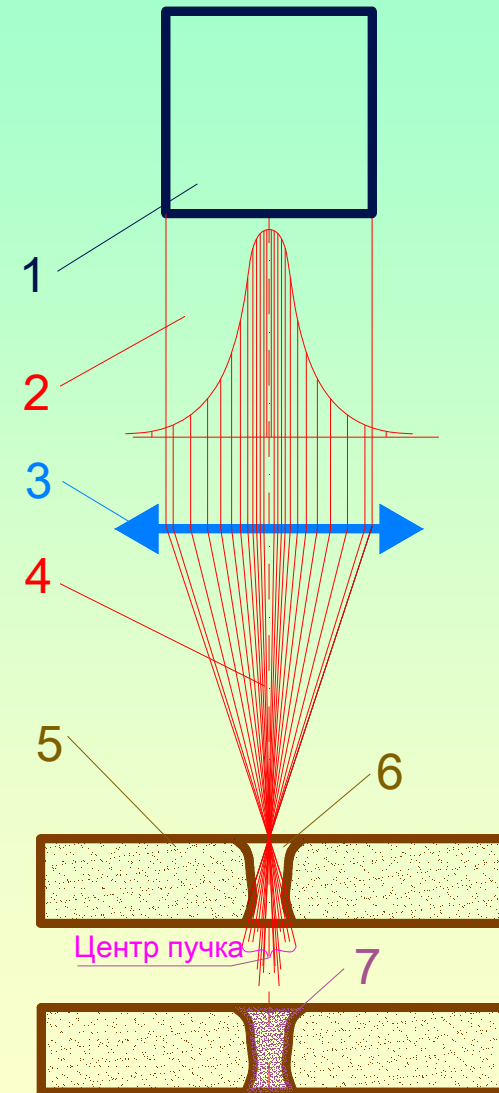


Рис.3.25.Схема ремонту отворів лазерним променем

Додаток до розділу 3.1 (завдання на СРС)

1. Завдання на СРС 1: Три метода впливу на енергетичні параметри пучка випромінювання. Описати та визначити - який з них має параметричний характер впливу на пучок? Пояснити причини їх діяння.

2. Завдання на СРС 2: Які відомі аналогові засоби налагодження положення заготовки у каустиці пучка. Визначити недоліки та порівняти з характеристиками налагодження за подвійним зображенням.

3. Завдання на СРС 3: Навести конструкції формуючих ліній накачки лазерів. Які конструкції дозволяють параметрично змінювати тривалість лазерного імпульсу?

4. Завдання на СРС 4: Чим визначається кут розбіжності пучка лазерного випромінювання? Які резонаторні та поза резонаторні засоби впливу на нього мають параметричний характер зміни властивостей пучка?

5. Завдання на СРС 5: Класифікація засобів та способів додаткового вдосконалення технологічної операції за метою, яка досягається.

6. Завдання на СРС 6: Наведіть відомі або розробіть оригінальні приклади схем або конструкцій засобів підвищення якості та продуктивності лазерної обробки отворів. Використати патентну інформацію з шести країн (США, ФРН, Великобританія, РФ, Франція, Швейцарія).

Додаток до розділу 3.1 (завдання на СРС)

7. Завдання на СРС 7: Навести вимоги до покриттів з позицій їх ефективності, зручності використання та утилізації. Обґрунтувати наведені якості та дати оцінку їх економічності.

8. Завдання на СРС 8: Вивести розрахункові залежності для забезпечення операції двосторонньої обробки з автоматичним змінням сторони обробки в том числі для оцінки показників чутливості та якості повздожньої форми отвору після ЛРО.

9. Завдання на СРС 9: Вивести розрахункові залежності для забезпечення операції односторонньої обробки з автоматичним змінням умов опромінення в том числі для оцінки показників чутливості та якості повздожньої форми отвору після ЛРО.

Контрольні запитання та завдання

1. Яким чином зазвичай керують режимом роботи лазера і до яких наслідків це приводить?
2. Мотивуйте необхідність незалежного впливу на кожен параметр пучка випромінювання і чому потрібні для цього особливі методи налаштування режиму роботи лазера?
3. Через які механізми енергія накачування багатосторонньо впливає на енергію імпульсу випромінювання?
4. Який принцип покладено в основу параметричного керування енергетичними параметрами випромінювання?
5. Якими засобами можна впливати на тривалість імпульсу випромінювання?
6. Якими засобами в резонаторі і поза ним можна впливати на кут розбіжності пучка випромінювання?
7. Чи можна параметрично (без впливу на енергію та розбіжність) змінювати поперечний розмір пучка випромінювання?
8. В яких випадках доцільно використати додаткові методи та засоби вдосконалення ТО ЛРО? Визначити напрямки діяння на ТО та їх механізми.
9. За рахунок яких дій можна підвищувати ефективність та економічність ТО ЛРО? Чим відрізняються названі критерії операції?

Контрольні запитання та завдання

10. Як класифікуються методи підвищення ефективності ТО? Навести їх порівняльні оцінювання?

11. Як системно можна здешевити ТО ЛРО? Навести приклади реалізації методів та засобів впливу на техніко-економічний показник.

12. Які методи та засоби використовуються для стабілізації процесу діяння лазерного променя на час виконання ТО ЛРО? Навести схеми ТО та ескізи конструкцій засобів.

13. Які трансфокатори використовуються в ТО та з якою метою? Порівняйте їх можливості та зручність в використанні.

14. Викласти принцип підтримання стабільності процесу обробки в ТО ЛРО з використанням явища дисперсії світла. Що дає його використання і які вимоги це накладає на лазерну техніку та технологію?

15. Що таке ремонт отворів в філь'єрах, ситах, дозувальних пристроях та витратних шайбах? Що заважає використовувати традиційну операційну схему? Який шлях використовують для забезпечення виконання ТО по ремонту отвору.

16. Чим можна укомплектувати ТО для розширення її можливостей та надання виробу додаткових властивостей?

17. Які технологічні схеми використовують для операцій лазерної обробки глибоких циліндричних отворів?

Бібліографічний опис до розділу 3.1

38. Заявка Японії № 61-99506 В23К 26/18, оп.17.05.1986р
39. Заявка Японії № 50-37918 В26F 1/30, оп. 05.12.1975р
40. Заявка Японії № 61-108487 В23К 26/00, оп. 27.05.1986р
41. Заявка Японії № 59-127984 В23К 26/10, оп.23.07.1984р
42. Заявка Японії № 48-26280 В23F 4/30, оп. 08.08.1973р
43. А.с. СРСР № 233100 МКІ³ В23К 26/00 оп. 01.10.1967р
44. А.с. 957508 СРСР, МКІ³ В23К 26/00. Спосіб обробки матеріалів лазерним випромінюванням [Текст] / В.П.Котляров (СРСР), №2936329/25-27; заявл. 09.06.1980р. (без публ.)
45. А.с. 970792 СРСР, МКІ³ В26К 26/00. Установка для пробиття отворів лазерним променем в прозорих матеріалах [Текст] / В.П.Котляров, (СРСР), №. 3266918/25-27 ; заявл. 31.03.1981р., (без публ.)
46. Патент Франції № 2033105 В26F 1/30, оп. 03.08.1970р
47. Заявка Японії № 56-160893 В23К 26/18, оп.10.12.1981р
48. Заявка Японії № 61-99506 В23К 26/18, оп.17.05.1986р
49. Заявка Японії № 50-37918 В26F 1/30, оп. 05.12.1975р
50. Патент 2118925 РФ, МКІ³ В23К 26/02. Способ лазерной технологической обработки материалов [Текст] / С.К.Семенов, Д.Б.Охрименко - № 97109218/02 заявл. 03.06.1997 ; опубл. 20.09.1998, бюл. 3 с. : іл.
51. А.с. 1037512 СРСР, МКІ³ В23К 26/00. Спосіб лазерної обробки матеріалів, прозорих для лазерного випромінювання [Текст] / В.П.Котляров, М.І.Анякін (СРСР), №3396222/25-27; заявл. 15.02.1985р. (без публ.)
52. Заявка Японії № 48-44459 В26F 1/26, оп. 25.12.1973р
53. А.с. 1349124 СРСР, МКІ³ В23К 26/00. Спосіб гравіювання матеріалів [Текст] / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, М.І.Анякін (СРСР), №3899558/25-27 ; заявл. 24.05.1985р. (без публ.)

Бібліографічний опис до розділу 3.1

54. А.с. 809731 СРСР МКІЗ В23К 26/12. Спосіб обробки матеріалів лазерним випромінюванням [Текст] / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, В.В.Романенко (СРСР) - №2796796/25-27 ; заявл. 13.07.1979р. (без публ.)
55. А.с. 745104 СРСР, МКІ³ В23К 26/00. Сопло фокуруючого пристрою для газолазерної обробки матеріалів [Текст] / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, В.І.Волгін (СРСР), №2699464/25-27 ; заявл. 21.12.1978р. (без публ.)
56. Заявка Японії № 61-106708 С21В 1/09, оп. 29.05.1986р
57. Патент Швейцарії № 611192 В23К 26/00, оп. 31.05.1979р
58. 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. 17.01.1979 ; (без публ.).
59. Патент РФ №1299025 МКІ³ В23К 26/00. Спосіб лазерної обробки [Текст] / В.И.Кравченко, Г.А.Галич, Ю.Н.Пархоменко (РФ). – 3870158/27 ; заявл. 21.03.1985; опубл. 27.11.1995
60. Заявка Японії № 54-18798 В23К 26/00, оп. 10.07.1979р
61. Заявка Японії № 54-18797 В23К 26/00, оп. 10.07.1979р
62. Петров М. Лазерная обработка материалов в электронике. Сб.: Компоненты и технологии, 19.10.2000, №.10
63. Заявка Японії № 58-135786 В23К 26/00, оп. 12.08.1983р
64. А.с. 1176532 СРСР МКІ³ В23К 26/14. Пристрій для лазерної обробки [Текст] / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, М.І.Анякін (СРСР) - №3725705 /27 ; заявл. 13.04.1984. (без публ.)
65. А.с. СРСР № 213517 С23С 17/00, оп. 19.02.1974р
66. А.с. 1169277 СРСР МКІ³ В23К 26/00. Спосіб лазерного пробивання отворів [Текст] / В. П. Котляров, В. С. Коваленко, М.І.Анякін (СРСР). – № 3700736 /– 27 ; заявл. 04.03.1985 ; (без публ.)

Бібліографічний опис до розділу 3.1

67. А.с. 1185770 СРСР МКІ³ В23К 26/00. Спосіб лазерного пробивання отворів [Текст] / В. П. Котляров, В. С. Коваленко, М.І.Анякін (СРСР). – № 3718340 /27 ; заявл. 15.06.1985 ; (без публ.)