

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.3.136459

УДК 621.375.826:621

В.П. Котляров*, В.В. Синюченко
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ЗАСОБИ НАДАННЯ ГНУЧКОСТІ ІНСТРУМЕНТУ З ЛАЗЕРНОГО ПРОМЕНЯ

Проблематика. Існуюча думка про лазерний промінь як універсальний інструмент настільки справедлива, наскільки правильне судження про те, що металорізальний інструмент універсальний. Універсальність підтверджується можливостями інструмента, і порівнювані об'єкти в цьому сенсі практично рівні. Різниця в тому, що металорізальний інструмент створюється заздалегідь, у т.ч. й спеціальні його види, тоді як лазерний промінь стає інструментом у момент його використання. Останнє ускладнює і спрощує роботу технолога — його фантазія необмежена, можлива модернізація і розмірна модифікація схеми і конструкції інструмента, причому, впродовж технологічної операції. Це може бути досягнуто внаслідок унікальної властивості лазерного променя — його гнучкості.

Мета дослідження. Знання цієї властивості променя не гарантує успішного його застосування, тому що недостатньо використати відомі оптичні елементи і їх схеми для перетворення променя на ефективний і різноманітний інструмент. У цьому полягає основна мета нашої роботи — нетрадиційними й іноді неочевидними технологічними і конструкторськими рішеннями показати приховані можливості лазерного променя як гнучкого інструмента.

Методика реалізації. Головною спонукальною причиною створення різноманітного інструменту є необхідність технологічного забезпечення нових або набору відомих технологічних схем формування зон опромінення для різних видів обробки: від поверхневої (гравірування, створення регулярного мікрорельєфу) до розмірної (прецизійної).

Результати дослідження. Для реалізації низки технологічних схем обробки показано результати розробки і використання традиційних і оригінальних засобів перетворення лазерного променя на інструмент (оптичних елементів зі змінюваними параметрами, комбінованих систем для комплексної дії променя на заготовку, для розширення зони його дії, для медицини).

Висновки. Гнучкість лазерного променя при перетворенні його на оброблювальний інструмент — це не стільки притаманна йому властивість, скільки шанс технологів спростити виконання технологічних операцій і урізноманітнити їх результати.

Ключові слова: лазерний промінь; технологічний інструмент; операції лазерної обробки; перетворювальні оптичні елементи; сканери; трансфокатори; об'єктиви.

Вступ

Від початку використання лазерного променя для виготовлення деталей виробів виникло помилкове уявлення про його універсальність, тобто можливість бути використаним у багатьох технологічних операціях через його особливу властивість — гнучкість. На той час таке уявлення було викликане кількома чинниками. По-перше, обмежений різновид лазерів та створених на їх базі лазерних технологічних установок (ЛТУ) змушував переобладнувати їх для застосування в операціях, для яких вони не були призначені. Наприклад, лазерна прошивка отворів у корпусах ін'єкційних голок у промисловому масштабі (5 млн штук на рік) виконувалася на ЛТУ для загартування Квант-10 (16) [1], автоматизоване гравіювання на пластикових корпусах штепсельних роз'ємів логіну підприємства та типу роз'єму — на ЛТУ для зварювання

і загартування Квант-18, а лазерне розділення природніх алмазів розрізання та розколювання — на ЛТУ для зварювання СЛС-10-1 [2]. Для масового виготовлення розпилюючих отворів у корпусах форсунок дизелів кораблів військово-морського флоту була модернізована ЛТУ “Кристал-6” [3]. У цих та інших випадках об'єктом модернізації був лазер, резонатор якого та система накачування активного середовища суттєво змінювалися для надання лазерному променю бажаних властивостей: режиму подачі енергії, просторових характеристик (розміру та форми попереку, кута розбіжності, заповнення променя електромагнітною енергією), тобто створенню променя як заготовки, з якої оптичними засобами формується оброблювальний інструмент. Другим чинником широкої модернізації ЛТУ були відносно невисокі вимоги до якісних результатів лазерної технології: форми отворів і точності їх розмірів.

* corresponding author: kotlyarovv@ukr.net

З підвищенням вимог до якості обробки змінилася стратегія розвитку лазерної техніки та технології. Замість ЛТУ універсального призначення почали випускатися спеціальні установки, призначені не тільки для конкретного виду обробки, а й для обмеженого розмірного ряду оброблюваних елементів, але з підвищеними критеріями якості (повздожньої форми отворів, попереку зварювальної ванни, шорсткості поверхні оброблених елементів). Так, одним із провідних європейських виготівників ЛТУ фірмою Trumpf (ФРН) лазери та оброблювальні систем на їх базі згруповані в перелік за призначенням (обробка листового матеріалу: для металів із використанням твердотільних – дискових і волоконних – лазерів до 8 кВт [4], для пластику, деревини – CO₂ коаксіальні та лазери з повздожнім швидким прокачуванням потужністю до 12 кВт [5]). Для прецизійної обробки та гравірування використовуються твердотільні лазери з ламповим або діодним накачуванням, які працюють у 2D- та 3D-просторі, наприклад в ЛТУ серії LASMA. За таким принципом побудовані каталоги іншої фірми – Rofin.

Звісно, сучасні ЛТУ компонуються перетворювальними оптичними системами, які сприяють розв'язанню складних технологічних задач, але їх схеми та конструкції тим більше не піддаються рекламі й становлять не меншу таємницю, ніж “know how”, що підтверджується в [6], а також ціною устаткування (більше 100 000 €). У зв'язку з цим найбільш складним з обов'язків технолога з лазерної обробки є етап технологічного оснащення операції, що проектується, завданням якого є створення засобів перетворення вибраного та модернізованого лазерного променя в робочий (оброблювальний) інструмент. Складність пояснюється відсутністю кваліфікованих рішень у вигляді довідників, атласів та науково-технічної літератури з прикладами подібних пристроїв. Тому потрібне інформаційне поле можна знайти в царині інноваційних проектів, тобто в базах даних винаходів, наукових і технічних публікацій у найбільш розвинутих у технології лазерної обробки країнах (США, Японії, РФ, ФРН, Франції, Швейцарії та Україні), причому не кращих їх зразків.

Постановка задачі

Вважаючи, що в наших традиціях прикладна складова наукових розробок не є пресстижною працею, часто не затребувана або не

достатньо стимульована, актуальною є спроба допомоги практикуючому технологу в реалізації спроб вдосконалення проєктованих операцій додатковими технологічними прийомами та засобами, наприклад наданням лазерному променю незвичайних властивостей, застосуванням нових пристроїв керування процесом обробки, використанням у деяких випадках принципів комбінованих та гібридних технологій тощо. Це надасть інструменту, створеному із заготовки – лазерного променя, – дійсну, а не гіпотетичну гнучкість.

Результати розробок

Особливості лазерного променя. Для перетворення лазерного променя, який характеризується хвильовими, енергетичними, часовими, розмірними та просторовими параметрами, в інструмент застосовуються оптичні засоби на прозорих заломлювальних та дзеркальних елементах і їх композиціях. Перетворенню може підлягати один чи декілька параметрів одночасно залежно від складності технологічного завдання та відмінностей між лазерним променем і оброблювальним інструментом з нього, причому параметричне перетворення променя іноді реалізується важче, ніж комплексне. Враховуючи унікальні властивості лазерного променя, які завдячують механізму його створення в резонаторі випромінювача, при розробці оптичного елемента чи оптичної системи необхідно мати на увазі, що:

(а) застосування елементів з перетворюючою метою ефективніше усередині резонатора, ніж ззовні, якщо досягається однакова мета;

(б) розміщення перетворювальних чи обмежувальних елементів на шляху променя викривляє його хвильовий фронт;

(в) кількість перетворювальних елементів повинна бути найменшою з метою зниження енергетичних втрат як на межових поверхнях, так і в їх тілах;

(г) бажано використовувати багат шарові просвітлення прозорих оптичних елементів на довжину хвилі робочого випромінювання.

У зв'язку з тим що лазерний оброблювальний інструмент технолог створює з лазерного променя, йому необхідно знати деякі фундаментальні особливості та виключити помилкові уявлення про останній, які існують на інженерному рівні. По-перше, лазери, що використовуються в технологічних установках, взагалі не є джерелами монохроматичного, тим більше

когерентного, випромінювання. Їх можна вважати такими умовно тому, що є ширина лінії люмінесценції активних середовищ, яка становить 10^{-4} – 10^{-6} % від робочої частоти випромінювання, а його хвильовий фронт майже плоский лише для резонатора Фабрі–Перо із застосуванням модових діафрагм з метою виключення поперечних мод. Для виключення зайвих подовжніх типів випромінювання (подовжніх мод) використовуються дисперсні дзеркальні системи замість напівпрозорого дзеркала резонатора з метою досягнення монохроматичності променя. Необхідно також враховувати тип поляризації променя та вид енергетичного заповнення його попереку, пов'язаного з його модовою структурою.

Прийнято характеризувати промінь такими його показниками (згідно з DIN EN ISO 11145):

- добуток параметрів променя (beam parameter product): $BPP = w_0 \times \theta/2 = (\lambda \times M^2)/\pi$ (мм×мрад) (w_0 – радіус перетяжки каустики резонатора, θ – кут розбіжності променя) – характеризує його здатність до перетворення оптичним елементом: чим менше добуток, тим у меншу за розміром зону промінь може бути сконцентрований при більшій глибині різкості оптичного елемента: наприклад, промінь дискових лазерів TruDisk мають $BPP = 2$ – 8 мм×мрад (при потужності променя $P = 2$ – 8 кВт), а лазерів TruPulse – $BPP = 4$ – 25 мм×мрад (для середньої потужності $P_{cp} = 20$ – 530 Вт) [4];

- коефіцієнт поширення променя (bending measured value) ($M^2 = \pi w_0 \theta / 2\lambda$) і фактор поширення променя (beam propagation factor) (прийнятий у Європі) $K = 1/M^2$ визначають якість променя: промінь коаксіального лазера на CO_2 TruCoax має $M^2(K) = 1,1$ (0,9) при $P = 2,0$ кВт, а промінь прокачного лазера TruFlow має $M^2(K) = 1,67$ (0,6)– $4,5$ (0,22) при $P = 0,7$ – $20,0$ кВт; дисковий лазер TruMicro має промінь з $M^2 < 1,3$ для $P_{cp} < 50$ Вт і $M^2 < 13$ для $P_{cp} > 500$ Вт [5].

Порівнюючи ці показники променя для CO_2 лазерів однієї потужності ($P = 2,0$ кВт) коаксіального типу з дифузним охолодженням TruCoax2000 та зі швидким повздовжнім прокачуванням TruFlow2000 $M^2 = 1,1$ і $1,67$ відповідно, можна зрозуміти, чому перший використовується в операціях прецизійного прорізання та свердлення, а другий – для зварювання, розрізання листів, гартування та наплавлення матеріалу.

Напрямок коливання вектора E визначає тип поляризації променя, та при незмінному його положенні відносно осі промінь має лінійну поляризацію, при обертанні навколо неї – плоску (кругову). Вплив типу поляризації дається знаки при поглинанні променистої енергії поверхнею заготовки: за відносного руху променя та заготовки вздовж напрямку вектора лінійно поляризованого променя підвищується рівень поглинання, що зменшує ширину та поглиблює слід впливу (при оплавленні), а також позначається на якості стінок різку і його ширині (в операціях розрізання).

Корекція параметрів лазерного променя. Підготування променя до його перетворення на оброблювальний інструмент може починатися до його надходження в оптичну систему ЛТУ тому, що, згідно з пропозицією пункту (а), ефективніше впливати на промінь із середини резонатора. Це стане корисним у разі потреби зменшення розміру його попереку за умови збереження інших параметрів, щоб не змінювати умови опромінення (інтенсивності променя $I_p = 4E/[\pi\tau(F\theta)^2]$, де E – імпульсна енергія, τ – тривалість імпульсу, F – фокусна відстань перетворюваного елемента) при заглибленні дна оброблюваного елемента в заготовці та відслідковуванні вибраним попереком променя за положенням дна (зміщенням оптичного елемента вздовж осі променя або використанням трансфокатора для його перетворення). На рис. 1, а зображено схему лазера з тридзеркальним резонатором [7], у якому використання діафрагми 4 з дзеркальною конічною поверхнею зі сторони активного елемента 3 дає можливість обмежувати діаметр променя під час його створення в резонаторі 1–2 отвором у ній $D_1 < D$, у межах якого між дзеркалами 1 і 2 зберігається позитивний зворотній зв'язок і створюється промінь відповідного розміру, але меншої енергії за незмінним рівнем накачування. Тобто діафрагмування приводить до одночасної зміни не лише його розміру з D до D_1 , а й енергії E і кута розбіжності θ до рівня $\theta_{D1} \approx \theta(D_1/D)^2$. Для реалізації параметричного керування енергією діафрагмованого променя торцеву конічну поверхню діафрагми 4 виготовлюють з кутом біля її основи ϕ . Якщо потрібно зберегти вихідний рівень кута θ_D , то потрібно кут ϕ вибрати з умови:

$$\phi \leq \frac{(a + b + nl)}{4(D - D_1)} \times \left(\frac{d_0}{F} \right)^2,$$

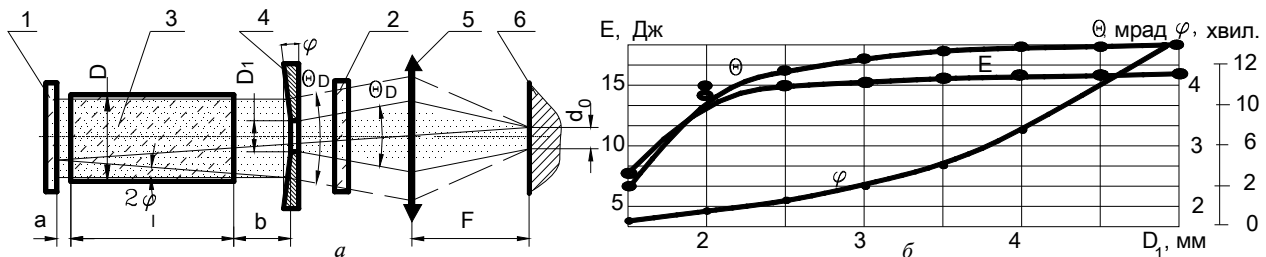


Рис. 1. Схема лазера з тридзеркальним резонатором: *a* – лазер, *б* – його параметри: 1 – 100 % дзеркало, 2 – напівпрозоре дзеркало, 3 – активний елемент, 4 – дзеркальна діафрагма, 5 – оптичний перетворювальний елемент, 6 – заготовка

а для збереження розміру зони опромінення в разі зміни фокусної відстані перетворювальної оптичної системи на F_1 : $\theta_{D1} = d_0/F_1$, де a , b та l – лінійні розміри резонатора, n – показник заломлення активного елемента, $\theta_D = d_0/F$ – кут розбіжності променя діаметром D . На рис. 1, *б* зображено вихідні параметри променя (E та θ) при зміні отвору в діафрагмі від 1,5 до 6 мм (діаметр активного елемента D). Видно, що, починаючи з діаметра отвору 2,0 мм, імпульсна енергія та кут розбіжності майже не змінюються до повного відкриття апертури активного елемента, який має розмір $\varnothing 6$ мм. Кут φ при цьому має змінюватися відповідно до графіка $\varphi = f(D_1)$ (див. рис. 1, *б*).

Альтернативні схеми елементів перетворювальної оптики. Поряд із загальновідомими оптичними елементами для перетворення лазерного променя на оброблювальний інструмент (для операцій прецизійної обробки виключно з прозорих матеріалів – заломлюючі промінь елементи: лінзи, призми, оптичні клини, а для операцій без особливих вимог до якості інструмента і для перетворення променя дальньої інфрачервоної області з $\lambda > 5$ мкм і потужністю $P > 6$ кВт перевагу віддають дзеркальним системам або сполучують їх із прозорими) застосовуються їх незвичні комбінації для розширення можливостей інструмента та підвищення ефективності операцій.

Для створення інструмента, який може використовуватися у багатьох видах операцій прецизійної обробки за спрощеним алгоритмом керування нею, а також для перетворення променів великої потужності (до 10 кВт) у подібний за властивостями до інструмента, створеного сферичними прозорими оптичними елементами, пропонується застосування пари циліндричних лінз, які розміщуються на шляху лазерного променя плоскими основами в перпендикулярній до його осі площині та з осями, що перетинаються під прямим кутом.

В операціях прецизійної обробки елементів міліметрових розмірів їх фрезеруванням або гравіруванням у межах апертури лазерного променя зі спрощеною підготовкою операції для одиничних заготовок кожній із циліндричних лінз надається можливість розмірного переміщення вздовж осі іншої [8] з відслідковуванням контуру обробки центром перетину осей (рис. 2, *а*). Переміщення може виконуватися вручну або механізовано в декартових координатах, що не потребує розробки програм для його виконання. Кожна з циліндричних лінз перетворює сегмент лазерного променя 1 на клин 5 та 6 завдовжки в хорду попереку лазерного променя, й у фокальній площині лінзи буде знаходитися його гостре ребро. Внаслідок того, що осі обох лінз взаємно перпендикулярні, а їх основи, які вважаються головними площинами лінз, ковзають одна по іншій, фокальні площини пари лінз будуть збігатися та знаходитимуться на поверхні заготовки 4. Дві каустики променя 5 і 6 у вигляді клинів у межах квадрата шириною, рівною ширині лінзи, сконцентрують енергію променя із зони їх перетину в зону опромінення на поверхні заготовки у вигляді квадрата мінімального перерізу. Це істотно підвищить інтенсивність випромінювання в його межах, що при достатньому її рівні викличе руйнування поверхні в обраному вигляді, залишаючи слід діяння променя. За керованим переміщенням лінз 2 і 3 відповідно вздовж координат X та Y сформується рисунок із лунок при взаємному їх перекритті. Декілька рядків лунок, виконаних із подібним перекриттям, сформують паз чи уступ, тобто виконають фрезерну операцію. За умови програмованого та механізованого переміщення можна створювати складні форми порожнин або слідів оплавлення. Вочевидь, ефективність використання системи із циліндричних лінз підвищиться, якщо їх ширина B буде перевищувати діаметр променя D . Тоді максимальні розміри зони опромінення будуть обмежені розмірами $B-D$

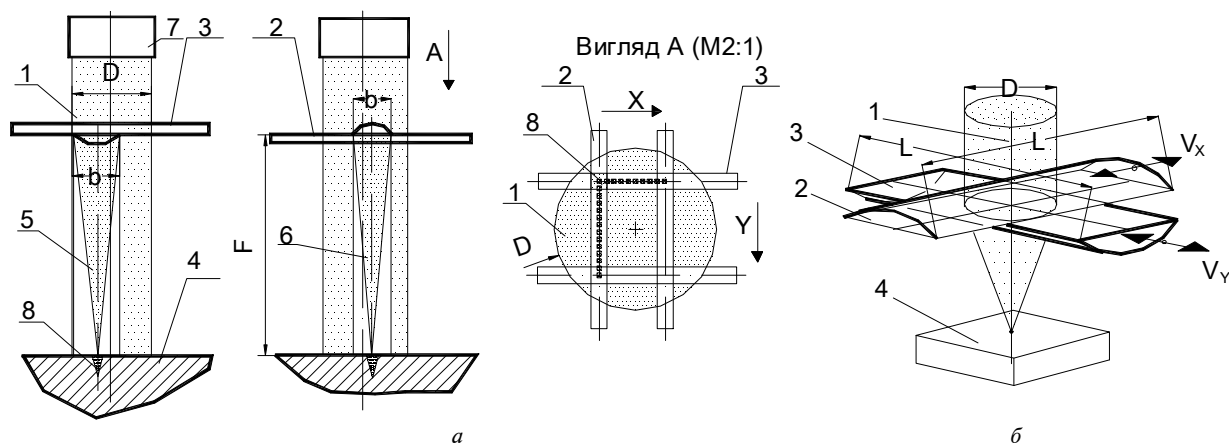


Рис. 2. Схема лазерної технологічної установки зі сканером на циліндричних лінзах для гравірування поверхні або фрезерування пазів і уступів (а) та оптична система для використання в лазерній технологічній установці з потужним променем (б): 1 – лазерний промінь; 2, 3 – циліндричні лінзи; 4 – заготовка; 5, 6 – каустика променя; 7 – лазер; 8 – одинична лунка

при повному використанні імпульсної енергії у промені.

Подібна схема об'єктива з циліндричних лінз може стати в нагоді при його використанні в операціях із потужним променем, особливо за безперервним режимом подачі енергії. Відомо, що прозорі оптичні елементи обмежені в застосуванні потужністю променя до 5,0 кВт тому, що через складність ефективного їх охолодження (рідинним способом – оправки лінзи або повітрям – обдуванням) вони раніше, ніж руйнуються, об'ємно нерівномірно деформуються, що викликає зміну їх оптичних параметрів, насамперед фокусної відстані. Схема використання циліндричних лінз, яку зображено на рис. 2, б, має такі особливості: довжина лінз $L \gg D$, а ширина перевищує його поперек. Якщо в процесі опромінення лінзи розмішувати на осі променя центром їх перехрещення, то енергія променя буде сконцентрована на поверхні заготовки в квадрат завширшки $b = F\theta$, площа якого лише в $4/\pi$ разів більша площі круглої зони після перетворення променя сферичною лінзою тієї ж фокусної відстані. Перевага цієї оптичної системи полягає в тому, що умови перетворення променя залишаються незмінними в разі зворотно-поступального переміщення кожної лінзи уздовж своєї осі X і Y на рис. 2, б, що дає змогу ділянкам лінз охолоджуватися при їх положенні поза променем [9].

Керування розподілом потужності в поперек променя. Як уже згадувалося вище, важливим показником якості лазерного променя є характер розподілу потужності в його поперек, який визначається параметрами резонатора

лазера і залежить від структури променя, його модового складу. Переважним є промінь з гауссовим розподілом потужності внаслідок мінімального значення ВРР, за рахунок як малості перерізу каустики резонатора, так і мінімального значення його кута розходження θ . Такі промені використовують в операціях прецизійної обробки (вирізання, гравірування, прошивка отворів), але процедура виділення променя з подовжніми модами TEM_{00} відсіченням поперечних мод супроводжується істотними втратами енергії. Багатомодові промені TEM_{mn} , особливо з високим порядком індексів m і n , також мають гауссові розподіли потужності для окремих мод, але їх суперпозиція вирівнює енергетичний поперек під час формування теплового джерела при поглинанні випромінювання в поверхні заготовки. Такий розподіл сприятливий для формування концентрованих теплових зон в операціях поверхневої обробки (гартування, легування і наплавлення) та зварювання. Обидва види розподілу потужності променя у його поперек мають загальний недолік – поступове зменшення її рівня при наближенні до периферії променя, що викликає зниження інтенсивності в цій зоні опромінення і формування в ній оплавлених ділянок, вимивання рідкого матеріалу з яких додає конічну ділянку отвору та виплеск матеріалу біля його гирла. Тому практикується виправлення вихідного поперечного розподілу оптичними елементами у складі перетворювальної оптичної системи. На рис. 3 зображено оптичну схему об'єктива з двох лінз, який використано для формування отвору циліндричної форми [10]. Якщо лазер L генерує промінь

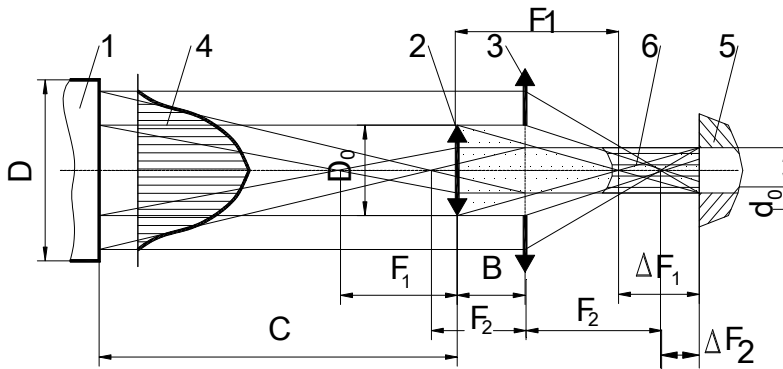


Рис. 3. Об'єктив із двох лінз, призначений для обробки циліндричних отворів та формування прямокутних пазів та різів: 1 – лазер; 2 – короткофокусна лінза; 3 – лінза з отвором; 4 – розподіл потужності в промені; 5 – заготовка; 6 – розподіл потужності в каустиці перетвореного променя

4 з гауссовим розподілом потужності у його поперек, то, якщо встановити на осі лазера на відстані C від його вихідного вікна об'єктив із двох лінз 2 і 3, першу 2 з фокусною відстанню F_1 і діаметром D_0 , меншим за діаметр променя D ($D_0 = 0,83D\sqrt{\alpha}$, де α – параметр розподілу потужності), та другу 3 на відстані B від першої, площини зображень кожної з двох лінз об'єктива 2 і 3 будуть суміщені та знаходитися на відстані ΔF_2 від фокальної площини лінзи 3 і ΔF_1 – від фокальної площини лінзи 2 загальна площина зображення торця лазера двома лінзами 2 і 3. Обидва зображення будуть накладені одне на інше в межах одного розміру d_0 , який вибрано, виходячи із технологічного завдання (розмір оброблюваного отвору або ширина паза). Периферійний промінь від лінзи 3 у вигляді кільця доповнює каустику центрального променя після лінзи 2 та вирівнює розподіл у ньому до майже рівномірного, що виключає розплавлення матеріалу навколо гирла отвору, а значить, і викид розплаву на поверхню заготовки. Габаритний розрахунок оптичної системи виконується за залежностями:

$$C = \left(1 + \frac{D_0}{d_0}\right) F_1 = \left(\frac{F_1 + \Delta F_1}{\Delta F_1}\right) F_1;$$

$$F_2 = F_1 \frac{D}{D_0} \left(\frac{D_0 + d_0}{D + d_0}\right)^2;$$

$$B = F_1 \left(1 + \frac{d_0}{D_0}\right) \left[1 - \frac{D}{D_0} \left(\frac{d_0 + D_0}{D + d_0}\right)^2\right].$$

Оптичні системи для прецизійної обробки. Характерними недоліками отворів після лазерної обробки є низька відтворюваність розмірів поперек, наявність на стінках залишків розплаву, конусоподібність вхідної частини та повздовжньої форми отворів. Ці вади операцій розмірної обробки завдячують розплавленому матеріалу, який супроводжує процес його випаровування та не видаляється із порожнини отвору в кінці імпульсу внаслідок зменшення інтенсивності в зоні опромінення та зниження евакуаційних можливостей парової фракції. Дійс-

ним способом підвищення якості оброблених отворів є скорочення часу опромінення до наносекунд зі збереженням рівня імпульсної енергії для підвищення інтенсивності на опромінюваній поверхні. Цей підхід виправдовується досяжною якістю, але істотно знижує продуктивність операцій. Так, наприклад, прорізання стінок трубки при виготовленні стентів імпульсами мікросекундної тривалості виконується з лінійною швидкістю 200–250 мм/хв, а при нано- та пікосекундних імпульсах не більше 5 мм/хв. Тому є привід застосовувати інші механізми обмеження розтікання тепла із зони нагрівання, наприклад знижуючи теплопровідність матеріалу заготовки подрібненням його структури або створюючи перешкоди на його шляху. Для заготовок із металів, які піддаються термічним структурним перетворенням у твердому стані (деякі латуні та залізо-вуглецеві сплави), операції прецизійної обробки повинні слідувати за операцією їх термообробки, якщо останні передбачені технологічним процесом. У разі відсутності потреби в останній можна використати локальне подрібнення матеріалу заготовки в місці розташування оброблюваного елемента [11]. Цю підготовку матеріалу можна виконувати локальною лазерною термообробкою завчасно у вигляді окремої відповідної операції або робити це послідовно в часі, опромінюючи зони розміщення елемента в режимі термообробки та прецизійної обробки. Завдяки гнучкості лазерного променя, що використовується як заготовка для його перетворення в оброблювальний інструмент, ці операції можна виконувати на одній ЛТУ зі зміною параметрів опромінення в перервах між імпульсами [12]. Можливо також цей

вид обробки виконувати протягом одного імпульсу [13]. Для цього імпульс випромінювання з параметрами, які підбрано для термообробки матеріалу заготовки в зоні, більший за діаметром та глибиною, ніж отвір (лунка), перетворюють об'єктивом із двох лінз 2 і 3 (рис. 4, а) на два інструменти різного призначення, які повинні виконувати одночасно дві операції: термообробки в зоні 7 діаметром d_{3M1} і глибиною h_{3M1} за час, який дорівнює тривалості імпульсу, та формування лунки 9 глибиною $h_{Л1} < h_{3M1}$ і діаметром $d_{Л1} < d_{3M1}$. Вочевидь, менш енергетичним та більш тривалим повинен бути режим термообробки, а режим подачі енергії для формування лунки більш інтенсивним, затриманим на деякий час відносно початку термообробки та коротшим, тому що, хоча об'єм лунки набагато менший зони термообробки, матеріал із неї повинен бути випарованим. Для цього скороченням часу опромінення необхідно суттєво підвищити інтенсивність у зоні опромінення. Першу вимогу реалізують вибором режиму роботи лазера 1 (за імпульсною енергією E і тривалістю τ) і розміру зони опромінення d_{3M1} , враховуючи, що ці параметри повинні бути у периферійній частині променя $D_n - D_c$ ($D_c = 0,83 D_n \sqrt{\alpha}$, де α – коефіцієнт зосередженості в гауссовому розподілі потужності). Розмір зони опромінення становить $d_{3M1} =$

$F\theta$, де $F = -F_1 F_2 / (-F_1 + F_2 - a)$, де a – відстань між лінзами 2 і 3, F_1 і F_2 – фокусні відстані лінз 2 і 3, робочий відрізок об'єктива $b = F(1 + a/F_1)$. Центральна частина променя b проходить через отвір у лінзі 2 та концентрується в зону обробки лінзою 3, фокусна відстань якої вибирається з умови $F_2 = d_{Л1}/\theta_{ДЦ}$, і це забезпечує вищий ступінь концентрації енергії, ніж навколо лунки у периферійному промені. Виконання другої вимоги, а також затримання процесу випаровування забезпечується розміщенням на шляху променя пасивного затвора 4 або в отворі лінзи 2 (рис. 4, а), або, що ефективніше, всередині резонатора 14 (рис. 4, б) лазера 1. З його допомогою затягується початок генерації центральною частиною активного елемента 13 (рис. 4, б) та вирізається найбільш інтенсивна порція імпульсу випромінювання. Якщо потрібно виготовити прецизійні наскрізні отвори в тонкостінній заготовці з чистого металу або сплаву, який не піддається структурному тепловому подрібненню, можна використати систему ЛТУ, зображену на рис. 4, б, у якій для перетворення лазерного променя також застосовано дві лінзи 2 і 3, причому останню виготовлено у вигляді кульки радіусом R із термостійкого міцного та прозорого матеріалу (кварцу – для випромінювання УФ, видимого та ІЧ діапазону з $\lambda < 2-3$ мкм). Фокусна відстань такої лінзи до-

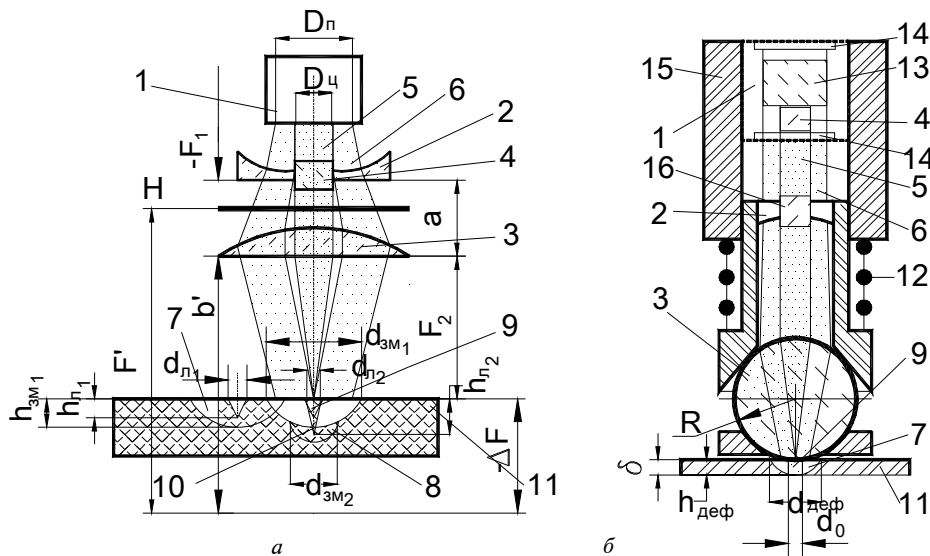


Рис. 4. Схема лазерної технологічної установки з оптичною системою для одночасної з прецизійною обробкою лунки термообробкою (а) або подрібненням (б) матеріалу в зоні її розміщення: 1 – лазер, 2 – від'ємна і 3 – позитивна лінзи, 4 – фототропний пасивний затвор, 5 – центральна частина лазерного променя, 6 – периферійна частина, 7 – зона термообробки, або деформування, матеріалу заготовки 11, 8 – зона термообробки другим імпульсом, 9 – оброблювана лунка (отвір), 10 – лунка після другого імпульсу, 12 – пружина, 13 – активний елемент, 14 – дзеркало резонатора лазера 1, 15 – корпус оптичної системи, 16 – оптичний елемент з нелінійними властивостями

рівнює $F = R[\operatorname{tg}(\varphi - \varphi_0) + \operatorname{Ctg}(\varphi - \varphi_0)]$, де $\varphi = \operatorname{arctg}(D_{\text{ц}}/R)$, а $\varphi_0 = \operatorname{arcsin}(\sin\varphi/n)$. Якщо кулька виготовлена з оптичного скла з $n = 1,5$, то $F_2 = 2R$, тобто центральна частина променя 5 концентрується в точці контакту кулі із заготовкою [14]. Периферійна частина променя 6 збільшує свій кут розбіжності після проходження від'ємної лінзи 2, тому лінзою-кулькою 3 концентрується навколо зони опромінення отвору 9. Під дією пружини 12 метал, прогрітий цією частиною променя, деформується від динамічного його навантаження, що викликає раптовим розм'якшенням, та набуває дрібної структури, в якій отвір формується дією лазерного променя 5 більш якісним. Для надання різних властивостей периферійній 6 та центральній 5 частинам променя останній набуває вищого рівня потужності в резонаторі завдяки пасивному затвору 4 і скороченій тривалості. Якщо матеріал заготовки має низьку поглинальну здатність випромінювання ближньої ІЧ-частини спектра, то розміщенням в отворі лінзи 2 кристала з нелінійними властивостями можна змінити частоту центральної частини променя на частоти його гармонік: $\nu_1 = 5,66 \times 10^{11}$ Гц, $\nu_2 = 8,45 \times 10^{11}$ Гц або $\nu_3 = 11,3 \times 10^{11}$ Гц (для YAG: Nd^{+3} $\nu = 2,83 \times 10^{11}$ Гц), що зумовить краще поглинання енергії променя та можливість більш гострої її концентрації [15].

Дві останні схеми ЛТУ можуть застосовуватися в операціях створення регулярного мікрорельєфу на поверхнях тертя виробів: зони термічного впливу ($h_{\text{зм}}$ або $h_{\text{деф}}$ (див. рис. 4, а, б)) використовуються для підвищення поверхневої твердості, а лунки створюють систему маслоємних акумуляторів для гарантування рідинного виду тертя в механізмі [16].

Зменшенню розтікання тепла із зони опромінення механізмом теплопровідності сприяє створення навколо неї теплової завіси, щоб понизити градієнт температури з матеріалом, який її оточує. Для цього об'єктивом із двох лінз лазерний промінь поділяється на два — центральний та периферійний, які, відповідно, формують прецизійний елемент (отвір, лунку) та оточують зону опромінення тепловою завісою [17]. Те ж завдання вирішує пристрій [18], але конструкція його елементів розширює його розмірні можливості та не потребує змінних елементів.

Пристрої для обробки глибоких циліндричних отворів. Обробка лунок і отворів глибиною більшою, ніж їх поперек, або в заготовках

більшої товщини, ніж глибина різкості оптичного елемента, викликає необхідність у періодичній зміні умов опромінення, тобто початкового розміщення каустики променя та заготовки для підтримання вибраного рівня інтенсивності на дні лунки (отвору) при її заглибленні. Якщо компоновка та склад ЛТУ дають змогу програмно виконувати їх кероване відносне зміщення вздовж осі променя, то завдання скорочується на один пункт, залишаючи умови звуження каустики до апертури обробленої частини лунки та підтримання рівня інтенсивності на її дні. Враховуючи, що більшість ЛТУ (старих та частково і сучасних) не має можливості керування процесом обробки в 3D-просторі, пропонуємо компенсувати цю ваду застосуванням оптичних елементів (систем) із можливістю оперативної зміни умов опромінення впливом на їх фокусну відстань, тобто трансфокаторів.

Найпростішим трансфокатором може слугувати лінза з можливістю зміни її робочого відрізка найлегшим способом — її нахилом [19]. На схемі (рис. 5, а) показано склад і принцип дії трансфокатора, де на шляху лазерного променя 3 від лазера 1 розміщена лінза 6 з пристроєм 4 нахилу її головної площини на кут γ навколо осі, яка знаходиться на останній, та нормальна до осі променя. Якщо кут нахилу лінзи 6 становить величину γ , то внаслідок повороту фокальної площини з позиції I в положення II осьовий промінь, що проходить через центр лінзи, перетне останню на величину Δh нижче: $\Delta h = F(1/\cos\gamma - 1)$, при збереженні майже колишнього напрямку його осі. Якщо по-в'язати порядковий номер імпульсу випромінювання при обробці глибокої лунки з кутовим положенням лінзи 6, наприклад через зворотний зв'язок за допомогою датчика 2 та лічильника імпульсів 5, пов'язаних із приводом 4 нахилу лінзи, то можна підтримувати на дні лунки постійний рівень інтенсивності пучка випромінювання в міру поглиблення лунки або виконувати поверхневу обробку заготовок змінної товщини (висоти) із вибраним законом зміни умов опромінення. Для операцій поверхневої обробки (гравірування, зміни поверхневих властивостей тощо) використання трансфокатора дає змогу формувати слід дії незмінних розмірів на похилих плоских поверхнях, на заготовках з уступами і з неплоскими поверхнями. Суттєвими недоліками цієї схеми трансфокатора є те, що при нахилі лінзи не тільки трохи змінюються поперечні розміри каустики,

але й створюється її осьова асиметрія внаслідок появи аберацій третього порядку (астигматизм і кома), що з'являється при перетворенні лінзами похилих пучків. Якщо перший недолік неістотний для виконання багатьох видів операцій, то усунення асиметрії є необхідною умовою успішного застосування такого принципу керування величиною робочого відрізка лінзи. Найбільш простим і ефективним конструкторським рішенням є обертання лінзи навколо осі променя з кутовою швидкістю ω ($\omega \geq 1/\tau$ для одноімпульсної обробки). Необхідність обертання лінзи під час обробки дає змогу, порушивши осьову симетрію лінзи **6** в оправі **14** через розміщення дисбалансу **17** на її периферії в нормальному напрямку на радіусі R до осі гоїдання в центрах **15**, використовувати відцентрову силу обертання для керування кутом нахилу лінзи: якщо необхідна величина приросту робочого відрізка ΔF лінзи, що дорівнює збільшенню глибини лунки одним імпульсом $\Delta F = \Delta h$, то кутова швидкість обертання повинна бути

$$\omega = \left\{ \frac{g}{R \{1 - [\Delta F / (1 + F)]^2\}^{1/2}} \right\}^{1/2}.$$

Попередній пристрій має обмеження на кут нахилу лінзи тому, що вісь променя зміщується на недопустиму величину внаслідок потовщення лінзи при її нахилі, а його поперек суттєво спотворюється та збільшується в розмі-

рі. Це обмежує товщину заготовки або глибину оброблюваної лунки. Для таких випадків пропонується трансфокатор на лінзі з її передньою заломлюваною поверхнею змінюваної кривизни. Гнучкість лінзи забезпечується її складною конструкцією – частина, яка обернута до заготовки, виготовляється з прозорого матеріалу, наприклад скла, а передню поверхню утворює рідина, яка за показником заломлення подібна склу (гліцерин, кремнійорганічні з'єднання, CCl_4). Якщо надати поверхні потрібний радіус кривизни R_1 , то вона разом зі скляною частиною з кривизною R_2 утворить лінзу з необхідною фокусною відстанню (d – товщина комплексної лінзи):

$$F_{\text{var } y} = \frac{1}{(n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \frac{(n-1)^2 d}{n R_1 R_2}}.$$

На рис. 6, *a* зображено схему трансфокатора [20], де **1** – стакан із дном у вигляді лінзи **2**, яка обернута сферичною поверхнею у бік заготовки, встановлений у підшипниках **4** у нерухомому корпусі **8**. Стакан заповнено рідинною компонентою трансфокатора **3**, рівень якої повинен забезпечити отримання очікуваного значення його максимальної фокусної відстані F_{max} , тобто $R_{1\text{min}}$.

Залежність $F = f(\omega)$ (рис. 6, *б*) побудовано для лінзи зі скла $\text{FK } 3$ ($n_{\text{л}} = 1,464$, $F_{\text{л}} = 40$ мм)

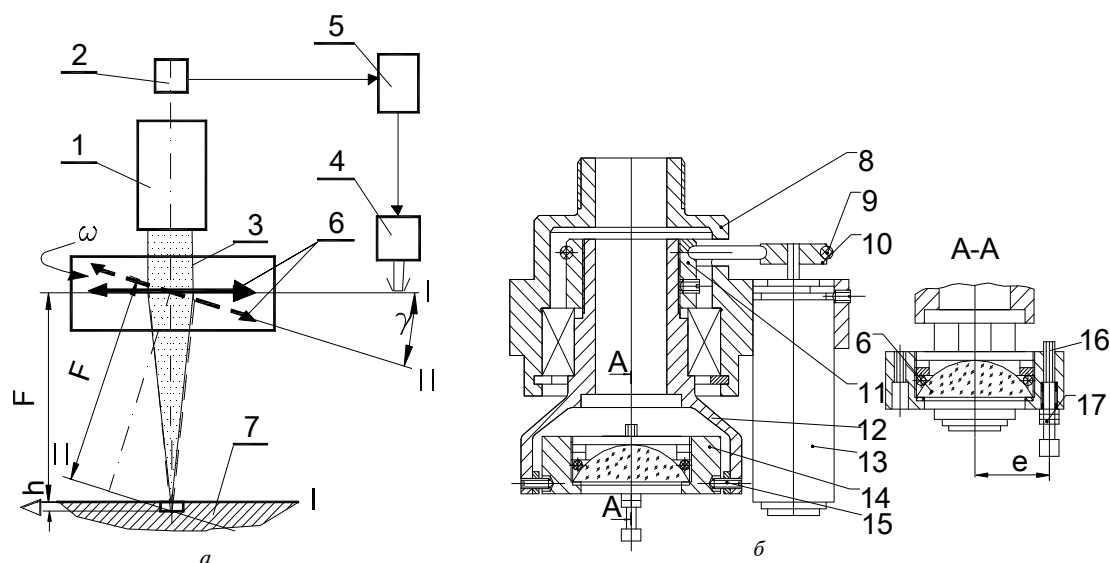


Рис. 5. Схема (а) та конструкція (б) трансфокатора на похилій лінзі: **1** – лазер, **2** – датчик імпульсів, **3** – лазерний промінь, **4** – привод нахилу лінзи, **5** – лічильник імпульсів, **6** – лінза, **7** – заготовка, **8** – корпус, **9** – пасік, **10** – шків, **11** – втулка, **12** – стакан, **13** – електродвигун, **14** – оправка лінзи, **15** – центр, **16** – гвинт регулювальний, **17** – дисбаланс

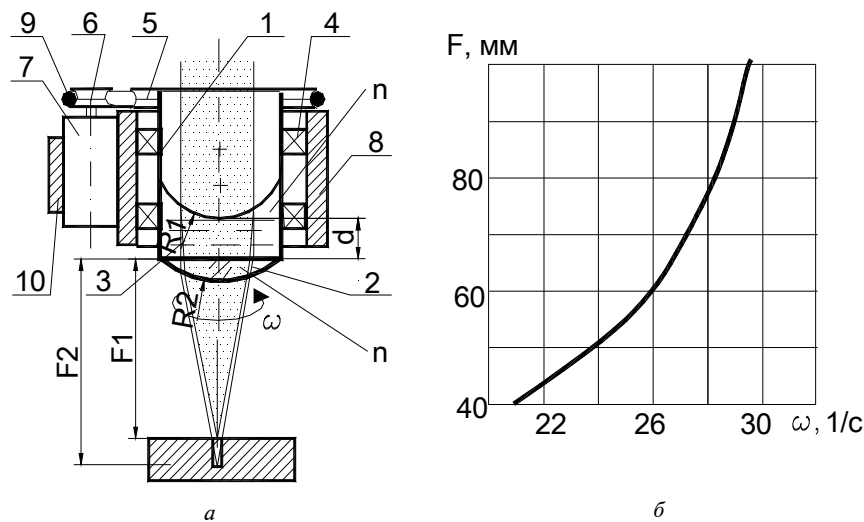


Рис. 6. Схема трансформатора із рідкою компонентою (а), експлуатаційна характеристика (б): 1 – стакан, 2 – лінза, 3 – рідина, 4 – підшипник, 5, 6 – шків, 7 – двигун, 8 – корпус, 9 – пасік, 10 – хомут

та гліцерину ($n_p = 1,469$, $H_p = 3,7$ мм при $\omega = 0$) як рідинної складової. Для потужних лазерних променів ($P > 1,5$ кВт) рекомендується застосовувати конструкцію трансформатора з проточною рідиною, яка одночасно послуговує як робоча рідина гідроприводу обертання стакана трансформатора і таким чином охолоджується [21].

Сканери як засоби розширення розмірних і функціональних можливостей лазерного променя як інструмента. При збільшенні розмірів оброблюваних елементів (діаметра лунки, отвору, ширини пазу, площі зони загартування, легування або наплавлення), підвищенні вимог до їх точності та якості поперек і повздовжньої форми, а також до однорідності розмірів і структури загартованого (легованого або наплавленого) шару на поверхні заготовки виконують додаткове до робочих подач швидкісне переміщення променя в зоні опромінення. Цьому сприяє те, що лазерний промінь не має маси, легко піддається керуванню розміром, напрямком поширення тощо. Найбільш поширені траєкторії сканування: коло, відрізок прямої лінії та спіраль. Для реалізації переміщень використовують заломлювальні та дзеркальні оптичні елементи, причому найчастіше ті, що застосовуються в оптичних перетворювальних системах. Для переміщення променя вздовж кола використовують лінзу, розміщену ексцентрично відносно його осі, яка має привод її обертання навколо останньої. Діаметр сканування дорівнює двом ексцентриситетам: $D = 2e$. Деталі конструкції визначаються засобами зміщення лінзи та оперативного керуван-

ня величиною ексцентриситету. На рис. 7 зображена одна з конструкцій [22], яка передбачає дистанційний зсув лінзи на визначений ексцентриситет, обертання її у цьому стані, сканування вздовж прямої лінії та вздовж спіралі при одночасній роботі обох приводів.

Лінза 1 в оправці 2 підвішена на двох плоских пружинах 3, які закріплено планками 11 до кільця стакана 4, внаслідок чого вона може гойдатися поперек променя без перекосу та вертатися в центральне положення на його осі. Гвинти 9, що утримають притискні планки 11, мають напівкруглі головки, які відполіровані та послуговують контактними елементами оправки 2 лінзи 1 з ексцентричним отвором у втулці 7. Остання разом зі стаканом зі шківом 4 розміщені на підшипниках 5 з різних сторін корпусу 6 об'єктива, а також має шків 13 на своєму фланці. За допомогою хомутів 8 два крокових двигуни 14 зі шківками 12 закріплені на зовнішній поверхні корпусу 6. Ці шківки з'єднані з відповідними шківками стакана 4 та фланця 13 пасіками 10. Керуючи по черзі або разом роботою двигунів 14, виконують: розмірне зміщення лінзи 1 на вибране значення ексцентриситету $e = 0 - e_{\max}$ за допомогою двигуна повороту втулки 7 або осцилюючі рухи лінзи вздовж лінії в межах $-e - e$. При обертанні зміщеної лінзи навколо осі променя за допомогою двигуна стакана 4 сканування буде виконуватися вздовж кола $D = 2e$. Одночасна робота двигунів викликає спіральний рух лінзи 1 (і променя) з кроком, який визначається співвідношенням швидкостей обертання двигунів.

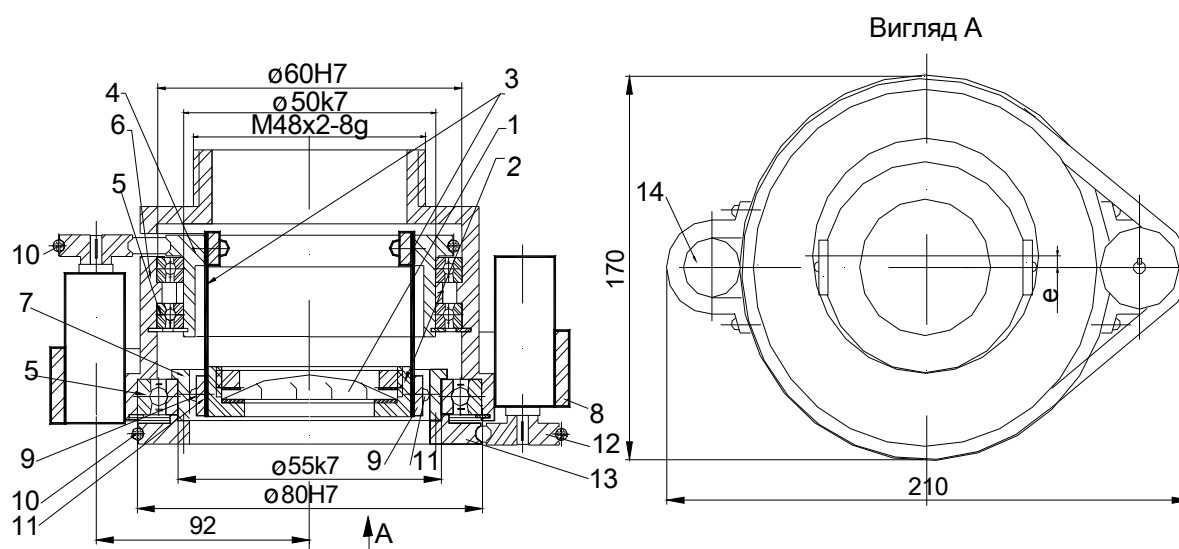


Рис. 7. Сканер на ексцентричній лінзі з плавним регулюванням радіуса сканування вздовж кола або амплітуди осцилюючого руху та кроку руху за спіраллю: 1 – лінза, 2 – оправка, 3 – плоскі пружини, 4 – стакан, 5 – підшипник, 6 – корпус, 7 – втулка, 8 – хомут, 10 – пасік, 11 – планка, 12 – шків, 13 – фланець, 14 – кроковий двигун

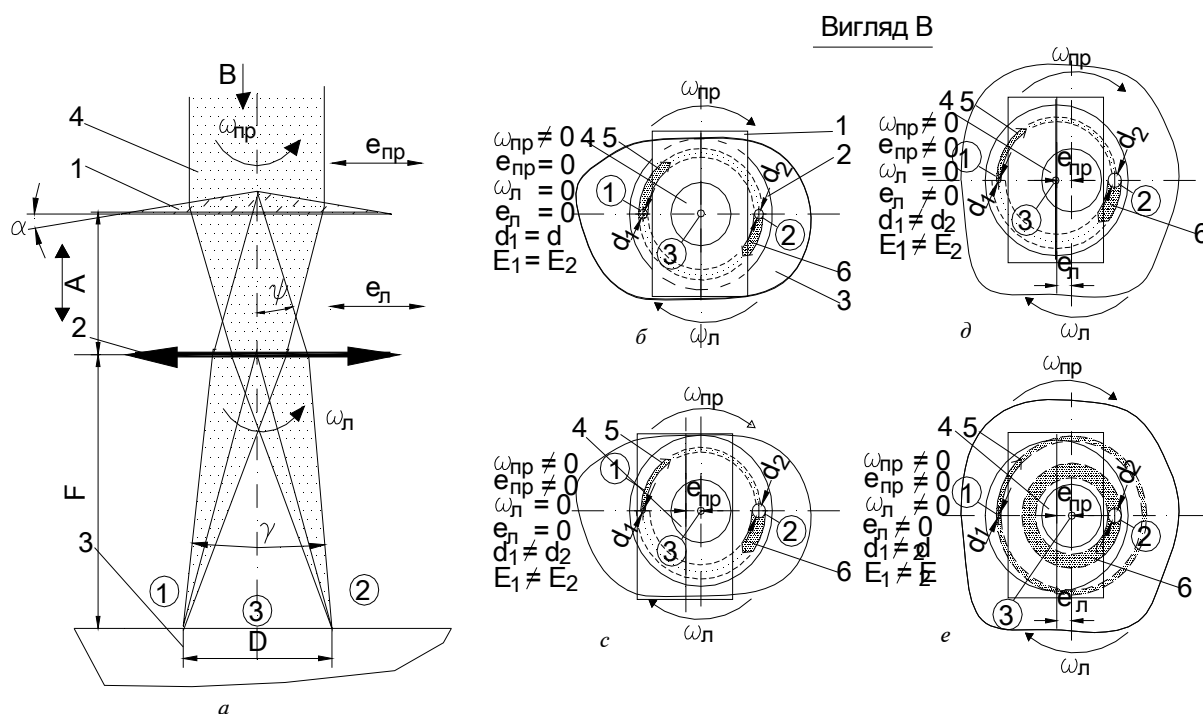


Рис. 8. Двопроменевий сканер: 1 – біпризма, 2 – лінза, 3 – заготовка, 4 – промінь, 5 – слід переміщення лівої частини променя, 6 – слід переміщення правої частини променя

Для виконання більш складних алгоритмів переміщення променя створена схема (і конструкція) сканера на біпризмі [23]. Наприклад, за умови достатньої потужності лазерного променя тривалість операції обробки отвору діаметром більше 1 мм за схемою трепанації його контуру можна скоротити вдвічі. При розміщен-

ні на осі променя перед лінзою 2 біпризми 1 з кутом біля основи α при оптичній густині її матеріалу n та її обертанні з визначеною кутовою швидкістю $\omega_{пр}$ (рис. 8, а) час вирізання отвору діаметром $D = 2Rg[\arctg(n-1)\alpha]$ скоротиться внаслідок необхідності повороту біпризми на півоберта (рис. 8, б). Якщо біпризму 1

здвинути з осі променя 4 на ексцентриситет e (рис. 8, *в*), то в кожній частині променя буде різна енергія: менша у того, в чий бік здвигнута біпризма, і їх сумісна дія може виконувати більш складні операції, наприклад правою частиною виконувати зварювання в режимі кинджального проплавлення, а лівою частиною – “лікування” гирла зварювального шва. При одночасному здвигу лінзи 2 на таку ж величину (рис. 8, *з*) можна виконувати центрування кільцевого шва без переміщення заготовки, що набагато простіше. Якщо в останньому випадку лінзі 2 надати обертання зі швидкістю ω_d навколо осі променя 4, то різні за потужністю частини променя виконують переміщення вздовж двох концентричних кіл (рис. 8, *д*). І це не всі можливості системи, якщо додати виконання відносного зміщення біпризми та лінзи вздовж осі променя.

Об'єктив для комплексної обробки кристалів. Кристали дорогоцінних та напівдорогоцінних мінералів використовуються ювелірами при виготовленні прикрас і технологіями в інструментальному виробництві. При їх обробці виконують операції (переходи) розділення кристалів розпилом або розколюванням, ограновуванням робочих граней і свердленням технологічних отворів. З урахуванням особливостей структури кристалів та їх властивостей, а також складності форми й мініатюрності переходи розмітки суттєво ускладнюють і подовжують операції. На рис. 9 зображена схема об'єктива для виконання комплексу переходів [24]. Заготовку кристала 5, що необхідно розділити за площинами спайності на складові більш правильної форми, розміщують на столі 8 та орієнтують її відносно осі оптичної системи, яка складається зі сферичної лінзи 2, що центрована

на відносно осі лазера 1, та з розміщених одна над другою циліндричних лінз 3 і 4. Останні встановлені в пазах на стінках оправки 6 з можливістю переміщення кожної вздовж осі іншої, а втулка може обертатися чи повертатися навколо осі оптичної системи в корпусі 7. Перед початком операції поперечним зміщенням поєднують середню точку визначеної лінії розділення заготовки $a-b$ (рис. 9, вигляд В) кристала з оптичним центром оптичної системи 2–3–4, причому циліндричні лінзи повинні знаходитися в центрі оправки 6. Для цього можна використати промінь лазера ($\text{AlxGa}_{1-x}\text{As}$) видимого діапазону $\lambda_{\text{AlGaAs}} = 0,62$ мкм. Далі необхідно зміщенням лінзи 2 уздовж осі променя розмістити її на відстані $F_2 - \Delta F_2$: $F_2 - \Delta F_2 = F_2 [1 - (l - F_2 \theta) / D]$ (вигляд А), де l – довжина лінії розділення кристала, θ – кут розбіжності променя, F_2 – фокусна відстань лінзи 2, ΔF_2 – величина зміщення фокальної площини лінзи з поверхні кристала. Циліндричні лінзи 3 та 4 повинні бути розміщені на відстані b_{2+3} від поверхні кристала: $b_{2+3} = F_{2+3}(1 - a/F_2)$, де $F_{2+3} = F_2 F_3 / (F_2 + F_3 - a)$ – фокусна відстань системи лінз 2 та 3, розміщених на відстані a одна від одної.

Поверотом втулки 6 навколо осі променя суміщають вісь однієї з циліндричних лінз, наприклад 3, із напрямком розділення кристала, а іншу лінзу (4) переміщують до збігу її осі з початком лінії $a-b$ (вигляд В). Далі включають лазер 1 та привод переміщення іншої циліндричної лінзи (4) уздовж осі лінзи 3. Серією імпульсів формують різ уздовж лінії розділення кристала. Лінза 4 відводиться в кінець ходу в

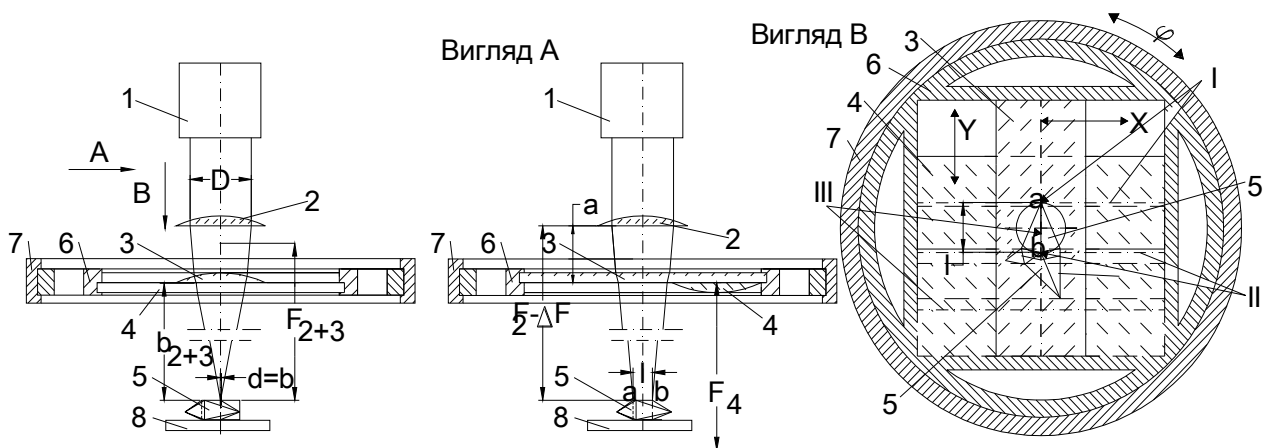


Рис. 9. Схема пристрою для комплексної лазерної обробки кристалів: 1 – лазер, 2 – лінза сферична, 3, 4 – лінзи циліндричні, 5 – кристал, що обробляється, 6 – оправка, 7 – корпус системи циліндричних лінз

оправці 6, і через лінзи 2 та 3 виконують опромінення дна сформованого різку променем з витягнутим попереком уздовж нього на режимі (енергія імпульсу, його тривалість та кількість імпульсів), достатньому для створення в заготівці достатнього рівня напруги розтягування для розколювання кристала вздовж площі спайності (для алмазу – октаедра) $\{111\}$. Інші види операцій виконуються за традиційними схемами.

Висновки

Виконані й апробовані результати розробок дають змогу рекомендувати враховувати деякі особливості перетворення лазерного променя на оброблювальний інструмент, включаючи етап його пристосування до режимних вимог (режим подання енергії, розмірні та просторові характеристики променя тощо).

- Для ефективного керування параметрами лазерного променя як заготовки оброблювального інструмента пропонується використовувати засоби резонаторного впливу в параметричному виконанні.

- Для оперативної та ефективної зміни режиму роботи лазера необхідно використовувати модуляцію випромінювання періодичною зміною добротності резонатора замість модуляції джерела накачування активного середовища.

- У разі необхідності пристосування лазерного променя до змінних поглинальних властивостей матеріалу або поверхні виробу, особливо при потребі пошарового його руйнування (наприклад, при обробці фольгованих конструкцій), рекомендується застосовувати гармонічну перебудову випромінювання оптичними елементами з нелінійними характеристиками.

- Потрібний розподіл енергії (потужності) випромінювання в зоні обробки треба створювати перебудовою попереку променя оптичними елементами з інтегральними відбивними властивостями взамін засобів його обрізання та фільтрування.

- При створенні перетворювальних оптичних систем на заломлювальних елементах необхідно передбачати їх багат шарове просвітлення на робочих довжинах хвиль, забезпечити ефективне охолодження та захистити крайові елементи від продуктів ерозії оброблюваних матеріалів.

- Невеликі та швидкісні відносні переміщення променя та заготовки (основні та додаткові) бажано виконувати за рахунок рухомих елементів оптичних систем, враховуючи нематеріальність лазерного променя.

- Перспективними приводами елементів оптичних систем є п'єзо- та магнітострикційні приводи, які малоінерційні, безшумні та швидкодіючі.

- Необхідно розширювати область застосування технологічного оснащення, насамперед за рахунок автоматизації контрольних переходів технологічної операції в режимі активного їх виконання при позитивному зворотному керуванні характеристиками інструмента на основі створеної його гнучкості.

Перспективи подальших досліджень визначаються наявністю замовників. За умови визначення потреб у застосуванні деяких із запропонованих приладів необхідне виконання сумісних із замовником робіт з відпрацювання реальних їх параметрів стосовно конкретних вимог ТЗ (при оцінці економічних показників їх застосування).

References

- [1] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Optimization of bore laser treatment process in the corps of injection needles", *Tehnologija i Avtomatizacija Mashinostroenija*, no. 34, pp. 51–57, 1984.
- [2] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Using of laser ray for the division of diamond crystals", *EOM*, no. 5, pp. 13–15, 1975.
- [3] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Laser size treatment in diesel building", *Proc. CSRI*, no. 75, pp. 144–155, 1979.
- [4] *High-Powered Disk Lasers* [Online]. Available: www.trumpf-laser.com
- [5] *Laser: Perfect Losen. TRUMPF Laser GmbH+Co* [Online]. Available: www.trumpf-laser.com
- [6] E.D. Vaks *et al.*, *Practice of Precision Laser Treatment*. Moscow, Russia: Technosphera, 2013.
- [7] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Laser", RU Patent 965921, March 31, 1981.
- [8] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Laser processing plant", RU Patent 1 116 621, April 25, 1983.
- [9] Japan request for patent 61-168058, Feb 03, 1986.
- [10] V.P. Kotlyarov *et al.*, "A laser device for treatment of opening without an entrance to the cone and burr", RU Patent 843380, March 24, 1980.
- [11] V.P. Kotlyarov, "A method of bore laser treatment in metallic templates", UA Patent 42516, July 10, 2009.
- [12] V.P. Kotlyarov, "A laser treatment device of bores in a hardware", UA Patent 42519, July 10, 2009.
- [13] V.P. Kotlyarov, "A friction surface treatment device by laser strengthening", UA Patent 87370, Feb 10, 2014.
- [14] V.P. Kotlyarov *et al.*, "A device for regular microrelief creation", RU Patent 1 092 035, Dec 21, 1982.

- [15] M. Petrov, "Laser treatment of materials in electronics", *Components and Technologies*, no. 10, 2000. Available: www.compitech.ru
- [16] V.P. Kotlyarov *et al.*, "A device for the laser strengthening of friction pairs", RU Patent 1 170 886, Feb 04, 1983.
- [17] "Lens", Japan request for patent 50-189240, 1975.
- [18] V.P. Kotlyarov *et al.*, "A lens for laser treatment", UA Patent 74855, Nov 11, 2012.
- [19] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Device for bore laser ray treatment", UA Patent 111049, Oct 25, 2016.
- [20] V.S. Kovalenko *et al.*, "Lens", RU Patent 574895, June 19, 1978.
- [21] V.P. Kotlyarov *et al.*, "A device for the focal distance change", UA Patent 74620, Nov 12, 2014.
- [22] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Laser beam scintiscanner", UA Patent 86593, Jan 10, 2014.
- [23] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Laser processing plant", RU Patent 1 541 926, May 18, 1988.
- [24] V.P. Kotlyarov *et al.*, "A device for template laser treatment", UA Patent 103138, Dec 10, 2015.

В.П. Котляров, В.В. Синюченко

СРЕДСТВА ПРИДАНИЯ ГИБКОСТИ ИНСТРУМЕНТУ ИЗ ЛАЗЕРНОГО ЛУЧА

Проблематика. Бытующее мнение о лазерном луче как универсальном инструменте настолько справедливо, насколько верно суждение о том, что металлорежущий инструмент универсален. Универсальность доказывается возможностями инструмента, и сравниваемые объекты в этом смысле практически равны. Разница в том, что металлорежущий инструмент создается заранее, в т.ч. и специальные его виды, тогда как лазерный луч становится инструментом в момент его использования. Последнее усложняет и упрощает работу технолога – его фантазия не ограничена, возможна модернизация и размерная модификация схемы и конструкции инструмента, причем в течение технологической операции. Это может быть достигнуто вследствие уникального свойства лазерного луча – его гибкости.

Цель исследований. Знание такого свойства луча не гарантирует успешного его применения, потому что недостаточно использовать известные оптические элементы и их схемы для преобразования луча в эффективный и разнообразный инструмент. В этом состоит основная цель данной работы – нетрадиционными и иногда неочевидными технологическими и конструктивными решениями показать возможности лазерного луча как гибкого инструмента.

Методика реализации. Основной побудительной причиной создания разнообразного инструмента является необходимость технологического обеспечения новых или набора известных технологических схем формирования зон облучения для различных видов обработки: от поверхностной (гравирование, создание регулярного микрорельефа) до размерной (прецизионной).

Результаты исследований. Для реализации ряда технологических схем обработки показаны результаты разработки и использования традиционных и оригинальных средств преобразования лазерного луча в инструмент (оптических элементов с изменяемыми параметрами, комбинированных систем для комплексного воздействия луча на заготовку, для расширения зоны его воздействия, для медицины).

Выводы. Гибкость лазерного луча при превращении его в обрабатывающий инструмент – это не столько присущее ему свойство, сколько шанс технологу упростить выполнение технологических операций и разнообразить их результаты.

Ключевые слова: лазерный луч; технологический инструмент; операции лазерной обработки; преобразующие оптические элементы; сканеры; трансфокаторы; объективы.

V.P. Kotlyarov, V.V. Sinjuchenko

MEANS FOR GIVING FLEXIBILITY TO A LASER BEAM TOOL

Background. Existing opinion of laser ray, as universal instrument, so justly, as far as judgment is faithful that a metal-cutting instrument is universal. Universality is confirmed by instrument functionality, and the compared objects in this sense are practically equal. A difference is in that a metal-cutting instrument is created beforehand, including its special kinds, while a laser ray becomes an instrument in the moment of its use. The latter both complicates and simplifies work of technologist – his fantasy is unlimited, modernization and size modification of chart and construction of instrument are possible, even during a technological operation. It can be attained because of unique property of laser ray – his flexibility.

Objective. Knowledge of this ray property does not guarantee its successful application, because it is not enough to use the known optical elements and their charts for transformation of ray to the effective and various instrument. Herein there is the aim of the paper – by unconventional and sometimes unobvious technological and designer decisions to show hidden possibilities of laser ray, as a flexible instrument.

Methods. Principal incentive reason of diverse instrument creation is a necessity of the technological providing of new or set of the known flow sheets of zones of irradiation forming for the different types of treatment: from superficial (engraving, creation of regular surface relief) to the size (precision).

Results. For realization of treatment flow sheets range the results of development and use of traditional and original means of laser ray transformation into an instrument (optical elements with changeable parameters, combined systems for the complex affecting of ray purveyance, for expansion of his influence zone, for medicine) are shown.

Conclusions. Flexibility of laser ray at converting it into a processing instrument is less as inherent to its property, and more as chance for a technologist to simplify implementation of technological operations and diversify their results.

Keywords: laser ray; technological instrument; operations of laser treatment; transforming optical elements; scintiscanners; zoom lens; lenses.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
29 січня 2018 року

Прийнята до публікації
31 травня 2018 року