

Автоматизація технологічних застосувань лазерного променя

В. Л. Дубнюк¹ • В. П. Котлярів¹ • Р. О. Жук¹ • О. М. Степура¹

Received: 25 May 2025 / Revised: 25 August 2025 / Accepted: 8 September 2025

Анотація. Об'єктом аналізу є стан та рівень використання лазерного променя як інструменту (кількісних та якісних) у будь яких технологічних середовищах (медицина, обробка матеріалів, вимірювальні та контрольні операції, тощо).

Практичний досвід розробки та впровадження технологічних застосувань лазерного променя та огляд світової спеціальної літератури підтвердив очевидний факт, що головними чинниками його корисного застосування є можливість ефективного діяння на різноманітні матеріали, широкий діапазон керованої потужності променя (до 2.3 МВт) та досягнення високого рівня інтенсивності в зоні опромінення (до 10^{20} Вт/см²) шляхом обмеження розміру останньої ($<10^{-9}$ м) та тривалості її опромінення (10^{-15} с). Але деякі якості променя не прийняті до уваги і вони не використовуються.

Метою даних статті є підвищення якості технологічних застосувань променя лазера як інструменту шляхом використання усього переліку його незвичайностей.

До таких необхідно віднести нематеріальність інструменту, його прозорість, легка та швидкодіюча керованість основними параметрами (довжиною хвилі випромінювання, енергетичними та просторовими характеристиками). Вміле управління ними дозволяє суттєво покращити організаційні властивості багатьох технологічних застосувань променя в якості інструменту.

Прозорість та нематеріальність електромагнітної енергії променя не заважають поєднувати процес його діяння на об'єкт опромінення з одночасною оцінкою (вимірюванням) поточного результату. Такий активний контроль операції надає дані для керування її ходом, впливаючи на керуємі умови опромінення, що дозволяє автоматизувати операцію до її адаптивної організації. Приклади таких форм побудови технологічних застосувань променя відсутні у виробництвах, фахових та інших друкованих виданнях.

Ключові слова: автоматизація, лазерний промінь, характеристики променя, технологічна операція, адаптивна організація.

Вступ

Автоматизація технологічних систем, в тому числі операцій, є черговим етапом удосконалення їх складових, тобто методів та схем обробки, виду інструменту та технологічного режиму, а також “другорядних” їх переходів, таких, як завантаження та вивантаження заготовки, виконується з метою полегшення та прискорення операцій, зменшення неочікуваних похибок у їх виконанні, які позначаються на якості результатів (показників) виробленого продукту. Але, виражаючись більш точно, така модернізація спонукає до видалення

із ланцюга дій та засобів в операціях тих його ланок, які найменше схильні до стабільної роботи, тобто людського чинника. В операціях прецизійної обробки автоматизація іноді супроводжується застосуванням елементів, які покращують можливості людських властивостей таких, як зір, слух, тактильні відчуття, тощо. Для адаптивної форми організації операції необхідно застосування автоматизованих засобів визначення поточного рівня контрольованого показника, тобто створення бази даних останнього методами активного контролю, наприклад, при круглому та внутрішньому видах шліфування, під час токарної обробки циліндричних поверхонь [1]. В останньому випадку може бути застосовано безпосередньо під час виконання переходу вимірювання положення поверхні, що обробляється, контактним способом чутливими вібро відчутниками або безконтактним шляхом проектування про-

✉ В. П. Котлярів
kotlyarovv1943@gmail.com

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

філю поверхні променем на оптико електронні чутники та оцінкою результату за лазерним дифракційним методом, який засновано на освітленні об'єкту вимірювання когерентним лазерним випромінюванням, реєстрації світлових полів на виході оптичної системи та аналізі отриманої дифракційної картини. За таким принципом, але в перервах між переходами (пасивний прямий контроль) працював лазерний вимірювач величини зношення та похибки розташування робочої кромки ріжучого інструменту [2] і отриманий результат використовувався для їх компенсації в наступному переході операції. Це приклади використання лазерного променя в якості інформаційного сигналу про стан та розміри оброблювальної поверхні виробу, або положення оброблювального інструменту та зношення його ріжучих кромок в технологічних системах, що також застосовується при їх автоматизації. Але нас цікавлять системи, які використовують лазерний промінь в якості інструменту, що ускладнює контроль за його станом внаслідок нематеріальності та відсутності останнього в перервах між переходами технологічних операцій. В цих умовах ускладнено формування інформаційного сигналу для оцінки поточного результату дії інструменту на виріб, але є важлива можливість оперативного корегування течії процесу внаслідок спрощеного впливу на режими та умови опромінення внаслідок відомої гнучкості та оперативності керування параметрами лазерного променя, як заготовки оброблювального інструменту.

Враховуючи те, що повна автоматизація технологічних систем (процесів, операцій) найчастіше складається із діянь на їх складові (етапи, верстати, технологічне оснащення, переходи операцій, тощо), наприклад, завантаження та перевантаження заготовки між технологічним обладнанням, пакування виготовленого продукту, які універсальні для більшості систем, нижче будуть розглядатися засоби та способи автоматизації технологічних систем, безпосередньо пов'язаних з інструментом із лазерного променя, у вигляді технологічних операцій тому, що технологічний процес виготовлення більш менш складного виробу потребує участі і інших методів обробки наряду з лазерною.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На жаль, публікації в статтях, монографіях, матеріалах науково-технічних конференцій в Україні та за її межами за змістом рідко торкаються проблем технологій взагалі та лазерних, зокрема: мотивації їх використання, схем реалізації, методів визначення технологічного регламенту (режиму виконання операцій) та засобів їх технологічного оснащення, включно для контролю якості отриманих результатів. Що торкається бажання автоматизувати технологічну систему (операцію, процес), то, звісно, на підставі аналізу літератури і при відсутності публікацій на тему технологій не

може бути публікацій про вищий рівень їх організації при автоматизації як окремих їх переходів, етапів, так і досягнення автоматизації вищої ступені – адаптивної форми організації, тобто самоконтролю результату та корекції режиму їх досягнення. На цій підставі можна сформулювати проблему, частковому вирішенню якої торкаються наведені та розроблені авторами дані.

Цей стан технологічного використання лазерного променя викликає бажання та необхідність підвищення ступеня використання особливих властивостей інструменту із останнього для підвищення рівня тактики, стратегії та технологічного оснащення операцій до сучасного рівня організації інших більш “старих” технологій.

Напрями автоматизації технологічних операцій

Маючи кінцеву мету – повну автоматизацію технологічної операції та приймаючи до уваги вище наведене, визначимо окремі її переходи, які, на наш погляд, потребують автоматизацію для полегшення їх виконання, підвищення якості результатів та продуктивності без суттєвого підвищення повної собівартості операції.

Перший перехід після логістичних дій та завантаження заготовки у робочу зону технологічного обладнання (лазерна установка (ЛУ) або лазерного технологічного комплексу (ЛТК), який може вимагати процедуру автоматизації – це відносно позиціонування інструменту із лазерного променя та вимірювальної технологічної бази заготовки, відносно якої у $2D$ просторі повинен бути розташований інструмент у вигляді лазерного променя, якщо він не вимагає перетворення у робочий інструмент оптичною системою, та у $3D$ – додатково вздовж осі його каустики, створеною оптичною системою ЛУ. У першому випадку перехід аналогічний позиціонуванню свердла, зенкера, чи розгортки при механічній обробці і виконується відносним розташуванням інструмента та заготовки за допомогою керування переміщень вздовж координат X та Y системами числового програмного керування (ЧПК), процесорами або ЕОМ. У разі необхідності копіювання форми та розмірів інструменту в тілі заготовки додається необхідність додаткового його руху під час обробки вздовж третьої координати Z або розмірного попереднього (до початку обробки) їх відносного розташування вздовж останньої для керування розміром зони опромінення на поверхні, що обробляється (при лазерній обробці), який протягом виконання операції може змінюватися. Загальною особливістю операцій лазерної технології є вимога виконання цього переходу у відсутності інструменту в його робочому стані для виконання правил з охорони праці. Є практичні рішення цього завдання [3], які використовують різні засади їх діяння:

Перший спосіб складається із предметного розмірного моделювання положення та форми каустики променя, перетвореного оптичною системою у 3D просторі відносно положення заготовки, та наступного переміщення останньої у обраний її перетин. Характеризується низькими точністю та продуктивністю.

Другий спосіб відносного позиціонування виконується за наявності інструменту, але із ослабленого до безпечності персоналу променя. Зважаючи на те, що при зниженні енергетичних характеристик променя впливом на процес збудження активного середовища випромінювача одночасно змінюються його просторові параметри, зокрема діаметр променя D та його мода структура, і, як наслідок, кут його розбіжності θ . Це відбивається на формі, положенні та розмірах каустики, створеної оптичною системою ЛУ при перетворенні променя в інструмент. Тобто, налаштування за такими параметрами інструменту майже неможливе, якщо обране його положення не корегувати на основі перерахунку з урахуванням вказаних різниць.

За третім способом налаштування виконується за участю малопотужного випромінювання видимого діапазону від додаткового джерела (газовий лазер на $He-Ne$ або напівпровідниковий). Але проста підміна випромінювання робочого лазера на малопотужний промінь видимого діапазону від додаткового джерела хоча дозволяють візуалізувати процедуру налаштування, наприклад, мікроскопним методом в системі “окуляр – робочий об’єктив (лінза)” шляхом освітлення останнім поверхні заготовки та їх відносним переміщенням до суміщення зображення поверхні з площиною різкого зображення мікроскопу. В цьому разі до різниць між робочим інструментом та “вимірювальним” у другому способі додається різниця у довжині хвилі кожного із випромінювань внаслідок залежності показника заломлення матеріалу лінзи n від неї, тобто налагодження буде виконуватися для іншої лінзи за її фокусною відстанню. Це ніяк не спрощує, не уточнює та не скорочує тривалість цього переходу операції.

Тому у четвертому способі внаслідок аналізу якостей відомих та використаних в реальних оптичних системах ЛУ методів налаштування взаємного положення каустики променя та вимірювальної технологічної бази пропонується замінити оцінювання положення останньої за її різкості зображення у мікроскопі на “спосіб подвійного зображення” [3], який застосовувався у великих інструментальних мікроскопах виробництва Carl Zeiss (ФРН), у фотоапаратах з видошукачем “Зоркий”, “ФЕД”. У порівнянні “мікроскопний метод” та спосіб подвійного зображення за зручністю та точністю налаштування незрівнянні з першими двома, а між собою останній – має переваги тому, що, по перше, не залежить від якості зору оператора, стану поверхні заготовки та кутового її розташування відносно осі променя. До того ж виключається невизначеність положення площини різкого зображення внаслідок наявності глибини різкості мікроскопу (подвійна

довжина Релея), що підвищує ймовірність похибки налаштування. На рис. 1 зображено схему оптичної системи, в якій малопотужний промінь лазера 6 з віссю, паралельною осі робочого променя 2 , до поверхні заготовки 5 направляється через похиле дзеркало 3 із прозорим тілом від дільника у вигляді двох паралельних похилих дзеркал 8 і 9 , наслідуючи напрям осі робочого променя 2 , при чому вісь одного з них суміщається з останньою напівпрозорим дзеркалом 8 . Другий промінь, повертається непрозорим дзеркалом 9 , яке має можливість відхилятися від паралельного положення з дзеркалом 8 на кут $\pm\varphi$ і може бути направлений у бік об’єктиву 4 з кутом $\pm 2\varphi$ до першого променя. При паралельному стані цих двох променів ($\varphi = 0^\circ$) вони створять одну яскраво зображену зону на поверхні заготовки 5 при її розташуванні в фокальній площині об’єктиву 4 на відстані F . При іншому положенні заготовки вище ($-\Delta F$) або нижче ($+\Delta F$) фокальної площини створиться дві освітлені зони: в першому випадку – лівий в центрі променя 2 від робочого лазера (при його подачі), правий зміщено в праву сторону, у другому лівий залишається на місці, а правий – зліва від нього. Для суміщення обох освітлених зон при цих положеннях поверхні заготовки ($\pm\Delta F$) потрібно надати правому променю кут нахилу $\pm\varphi$:

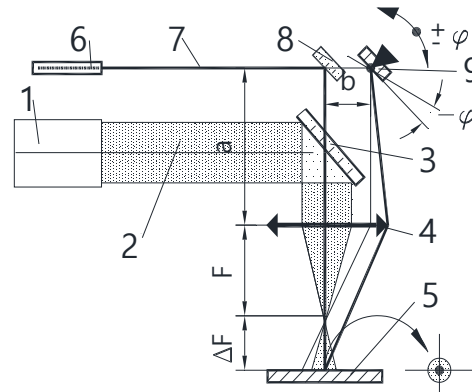


Рис. 1. Схема оптичної системи лазерної установки з використанням методу подвійного зображення для налаштування відносного положення об’єктиву та поверхні заготовки (1 – лазер ЛУ, 2 – робочий промінь, 3 – поворотне дзеркало, 4 – об’єктив, 5 – заготовка, 6 – лазер додатковий, 7 – промінь додаткового лазера, 8, 9 – дзеркала подільника променя 7)

$$\varphi = \frac{1}{2} \operatorname{arctg} \frac{a}{[(F-b) - F^2 / \Delta F]},$$

де: F – фокусна відстань об’єктиву для променя 7; a та b – розміри елементів оптичної системи; ΔF – розрахункова величина зміщення положення каустики внаслідок відмінностей у променів 2 та 7, викликаних їх різною довжиною хвилі (компенсування хроматичної

аберації), діаметрів променів D (для сферичних лінз – для компенсування сферичної аберації), їх кутами розбіжності θ та відповідно до режиму обробки зміщення поверхні заготовки для досягнення обраного положення ΔF в каустиці робочого променя.

Візуальне оцінювання положення заготовки в каустиці променя за оцінюванням різкості зображення її поверхні супроводжується помилками, пов'язаними з існуванням, зокрема, здатності ока до акомодатції, що збільшує невизначеність кінцевого результату на величину T :

$$T = \frac{250\varepsilon}{AG} + \frac{250}{G^2} + \frac{\lambda}{2A^2} = \frac{250 \times 0,0003}{0,51 \times 16} + \frac{250}{16^2} + \frac{0,0006328}{2 \times 0,51^2} = 0,97656 \text{ мм,}$$

де: ε – кутовий розмір роздільної здатності ока (0,0003 рад); $A = n \sin(D/2F)$ – числова апертура об'єктиву; G – видиме збільшення системи спостереження; λ – довжина хвилі додаткового лазера (для He-Ne лазера 0,0006328 мм). Числові дані вибрано для оптичної системи СОК-1 з об'єктивом $F = 20$ мм, окуляр $\Gamma = 16^*$).

Похибка знаходження поверхні заготовки при використанні способу подвійного зображення при помилці взаємного розташуванні на ній двох освітлених ділянок в межах 20 % від їх розміру d_0 , (при $F = 20$ мм і $\theta = 0,001$ рад та $b = 15$ мм) буде дорівнювати:

$$\Delta(\Delta F) = \frac{(0,2F\theta)F}{b} = \frac{0,2 \times 20 \times 0,001 \times 20}{15} \approx 0,005 \text{ мм.}$$

Таким чином, спрощення оцінювання результату налагодження відео чутниками за останнім методом супроводжується підвищенням точності виконання цього переходу операції при спрощенні процедури та елементної бази для його автоматизації.

Другий перехід операції зазвичай передбачає процедуру оптимізації схеми технологічної процедури для операції – це операційні ескізи. При перших застосуваннях лазерного променя в фізіотерапевтичних процедурах опромінення уражених зон виконувався при їх ручному обході лікарем, утримуючи джерело над пацієнтом. Далі до схеми процедури додався волоконний світловод з видаленням лазера із зони процедури. Великий кут розсіяння променя θ при виході випромінювання із торця волокна (досягає 30°) вимагає його близького розташування до опромінюваної поверхні. Це небезпечно для пацієнта та вимагає підвищеної уваги оператора (частіше лікаря). Зараз у районних та міських лікарнях процедура виконується на спеціальній апаратурі, в якій поступове променеве покриття зони, більшої ніж перетин променя, здійснюється його скануванням за растровою схемою, або за програмою у цифрових координатах. Така апаратура доволі автоматизована, але складна і коштовна, до її складу крім лазера додається сканер з керуючим процесором та

блок живлення. Зазвичай така установка потребує кваліфікованого обслуговування інженером, програмістом та оператором, чого не можуть собі дозволити поліклініки маленьких міст, селищ міського типу та ФАП'и сіл. Можна спростити схему такої процедури за рахунок виключення або заміни системи координатного обходу променем на його рух вздовж спіралі простим за конструкцією сканером, допускаючи можливість опромінення не тільки зон хірургічної інвазії, трофічних язв, ревматоїдного артриту, гнійних ран, тощо, а і здорові ділянки поверхні тіла пацієнта. Існують конструкції таких приладів у вигляді насадок на торць газозових лазерів на суміші He та Ne (моделі ЛГ208 та ЛГ311 Львівського НВО "Полярон") або з вузлами введення променя через волокно. Але не всі вони відповідають умовам їх застосування – рівномірне засвічення зон лікування (для випромінювання $\lambda = 0,6328$ мкм густина енергії W_E за процедуру повинна бути на постійному рівні 17,5–18 Дж/мм²). Це може бути досягнуто збільшенням потужності променя або шляхом зниження швидкості його руху із збільшенням радіусу спіралі або при постійній лінійній швидкості переміщення зменшувати її крок для часткової компенсації енергії у її попередньому витку на величину $S_{i+1} = S_i - \Delta S$, де: S_i – черговий крок, S_{i+1} – наступний крок; $\Delta S = f(R_i)$ – змінення кроку при радіусі спіралі R_i . Детальніше у [4]. Враховуючи, що постійне змінення режиму роботи лазера ускладнено, а використання електродвигуна із змінною кутовою швидкістю, наприклад, крокові двигуни потребують також програмного керування.

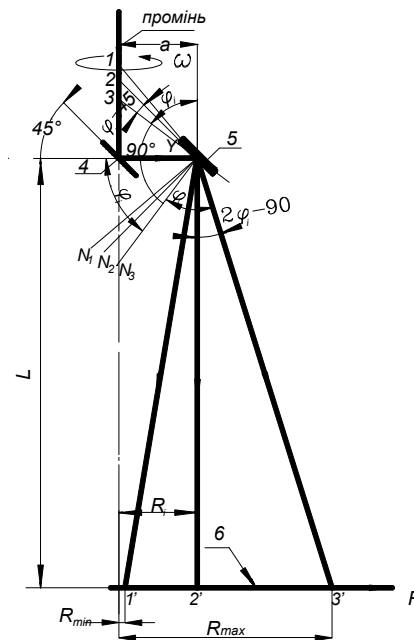


Рис. 2. Схема реалізації процедури опромінення (1, 2, 3 – кутові положення дзеркала; 4 – поворотне дзеркало, 6 – поверхня зони опромінення)

За обраною схемою опромінення (рис. 2) побудовано графіки змінення густини енергії W_E вздовж витків спіралі руху променя при різних закономірностях керування її кроком (рис. 3). Графік 3, який побудовано за результатами обертання променя та керування кроком спіралі кулачком 15 (рис. 4), за рахунок багатократного введення енергії променем у витки спіралі їх частковим накладенням один на другий, свідчить про виконання висунутих умов енергетичної насиченості опроміненої зони. Усі інші варіанти опромінення не досягають такого рівня стабільності.

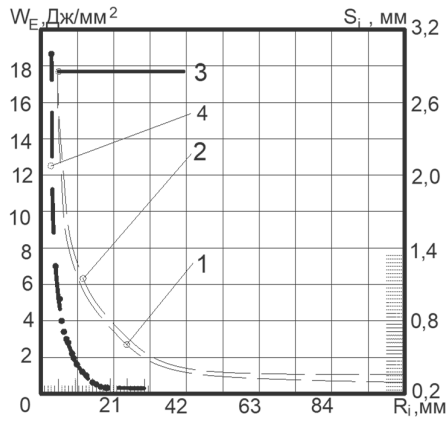


Рис. 3. Графіки змінення густини енергії у витках спіралі (1 – $S_i = d_{пр} = \text{const}$ ($d_{пр} = 3 \text{ мм}$); 2 – $S_{i+1} = S_i - \Delta S_i$ ($S_i = \text{const} = 0,04 \text{ мм}$); 3 – $S_{i+1} = S_i - \Delta S_i$ ($\Delta S_i = \text{Vary: } [W_E] - \text{const}$); 4 – $S_i = f(R_i)$)

В запропонованій конструкції сканера використано двигун 3 з редуктором, який забезпечує кутову швидкість обертання 2 об/хв без можливості її змінення. Тому постійний рівень густини енергії W_E , Дж/мм²

досягається шляхом керування кроком спіралі. Профіль кулачка (рис. 4, б) виконано у вигляді двох зсунутих зустрічно ексцентричних отворів розміром D_e . За один оберт кулачка 15 промінь повинен зробити один виток спіралі у двох напрямках з максимальним кроком, але додаткове обертання кулачка у той же бік, але з меншою кутовою швидкістю дозволяє керувати кроком спіралі, тобто замість одного витку буде зроблено набагато більше. Профіль кулачка проектується згідно із залежністю ΔS_i , обраною із графіків, подібних рис. 3. Для такої конструкції та обраної схеми опромінення автоматизація спрощується до завдання покриття зони опромінення, яка проходить по межах рани, тобто до максимального радіусу спіралі. Для кожного кулачка із відмінним профілем треба експериментально визначити залежність R_{max} від часу обертання та керувати режимом роботи, наприклад, через реле часу, що доступно у любому ФАП.

Третій перехід операції (або етапу процесу) торкається її головної складової – виконання технологічного завдання. Якщо обмежитися технологічними операціями лазерної обробки то внаслідок широкого проникнення лазерного променя у машинобудування потрібно їх поділити за механізмами досягнення корисного ефекту та його виду.

Операції, в яких результат досягається без суттєвого масопереносу матеріалу заготовки.

Такі операції для металевих заготовок виконуються променем з його інтенсивністю в зоні обробки в межах $I_p \in 10^4 - 10^5 \text{ Вт/см}^2$: операції поверхневої термообробки, очищення поверхні заготовки, а також деяких комбінованих з механічним та деформаційним діянням на останню. Загальною потребою для таких застосувань променя є необхідність у забезпеченні сталого та стабільного рівня поглинання поверхнею заготовки

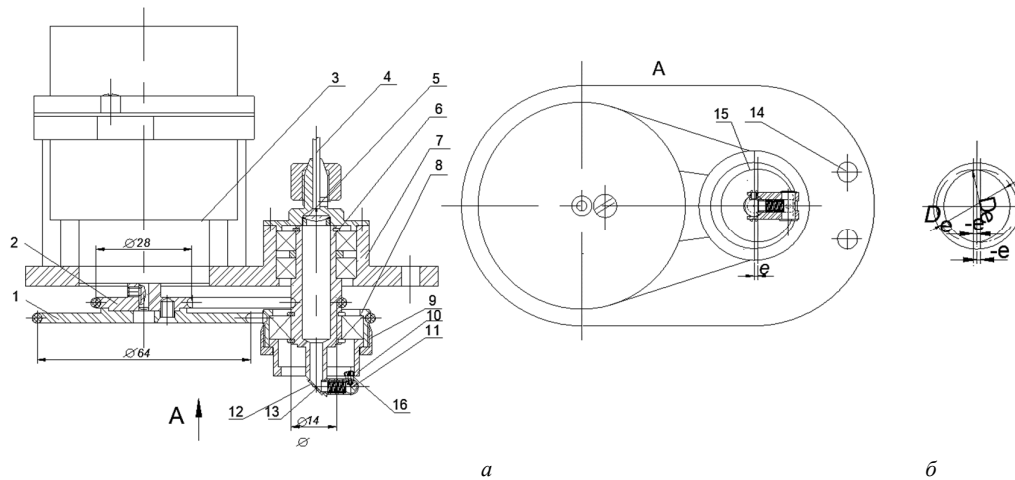


Рис. 4. Конструкція сканера фізіотерапевтичної установки (а: 1, 2 – шків на валу електродвигуна 3; 4 – світло волокно від лазера; 5 – лінза коліматор; 6 – втулка-вал; 7 – корпус; 8 – шків-втулка дзеркала; 9 – гайка кулачка 15; 10 – повідець; 11 – циліндрична вісь повідця; 12 – дзеркало поворотне; 13 – отвір; 14 – отвори монтажні; 15 – кулачок; 16 – отвір-профіль кулачка, б – профіль кулачка 15)

енергії променя. Чинниками, які впливають на рівень поглинання та, як слідство, на якість результату обробки є наявність на поверхні іржи, масляних плям, бруду, а також її не площинність з деформаційного та температурного діяння при транспортуванні та збереженні заготовки. Перші чинники нейтралізуються ретельним очищенням її поверхні або використанням хімічної обробки фосфатуванням, окисленням тощо. Очевидно, такі маніпуляції із заготовкою виконуються на спеціальному обладнанні хіміко-термічних цехів, ділянок і привносять додаткові логістичні витрати (часові та грошові).

Пристрої для автоматичної корекції нестабільних поглинальних здібностей поверхні заготовки (рис. 5, а) [5] та її не площинності (рис. 5, б) в операціях поверхневої обробки.

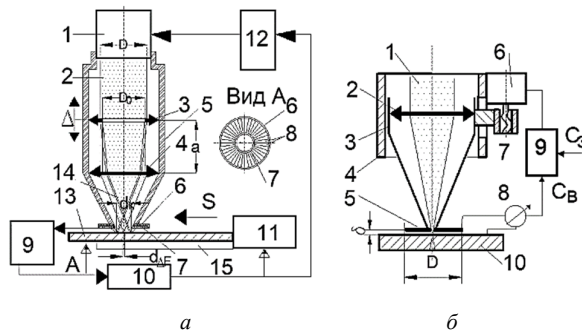


Рис. 5. Схема пристроїв для автоматизації операцій поверхневої лазерної обробки: (а – для стабілізації процесу поглинання енергії випромінювання поверхню заготовки: 1 – лазер; 2 – промінь; 3 – лінза з отвором; 4 – об’єктив; 5 – корпус пристрою; 6 – металевий диск з чутниками 7; 8 – сектори чутників; 9 – вимірювач; 10 – процесор; 11 – механізм переміщення заготовки; 12 – блок живлення лазера; 13 – заготовка; 14 – сконцентрована частина променя; 15 – стіл технологічний; б – для стабілізації умов опромінювання в разі деформованих листових заготовок: 1 – промінь; 2 – об’єктив; 3 – корпус об’єктиву; 4 – корпус пристрою; 5 – металевий диск; 6, 7 – привод переміщення об’єктиву; 8 – вимірювач ємності конденсатору 5–10; 9 – тригер; 10 – заготовка)

За рис. 5 а забезпечується автоматичне керування рівнем поглинання поверхні заготовки 13 шляхом аналізу її поглинальних здатностей навколо зони опромінювання в межах кільця діаметром d_k , більшого ніж розмір зони останньої $d_{\Delta F}$ шляхом аналізу відбитого від неї променя, вилученого з периферії робочої його частини 2, перетвореного лінзою 3 та об’єктивом 4. Ця частина засвічує постійно чутники 7 розташовані секторально на металевому диску 6. Відповідно до програми відносного переміщення променя та заготовки аналізується інформація вимірювачем 9 лише з 2 чутників, наприклад, 7 та 8, розташованих з сторони

початку руху столу 15 від привода 11. Процесор 10 відповідно до обраної тактики керування процесом може змінювати або швидкість переміщення S або потужність променя 2 через блок живлення 12 відповідним чином, підтримуючи обраний рівень поглинутої енергії вздовж руху променя.

Якщо до цієї схеми додати декілька елементів (рис. 5 б): привод переміщення об’єктиву 6, 7; вимірювач 8 ємності конденсатору, утвореному диском 5 і поверхнею заготовки 10 та тригер 9 працюючий у порівнянні вимірюваної ємності C_v та заданої C_z , то при зміні першої ємності за рахунок розміру зазору δ між диском 5 та заготовкою 10 буде працювати вузол переміщень об’єктиву 2 для відновлення зазору, тобто початкових умов опромінювання поверхні.

Операції, у яких рівень інтенсивності в зоні опромінювання досягає діапазону $I_p = 10^5 \div 10^6$ Вт/см², що викликає розплавлення більшості конструкційних матеріалів (металів та сплавів). Їх прикладами можуть бути операції легування або аморфізації поверхневого шару матеріалу, наплавлення додаткового шару, газолазерного розкрою листових заготовок та формування надглибоких мікроотворів.

Метою перших двох операцій є створення у приповерхневому шарі виробу матеріалу, іншого за складом, структурою для надання останньому особливих властивостей таких, як твердість, корозійна стійкість, визначений напружений стан тощо, що досягається при легуванні на деяку глибину матриці такими елементами, як W ($t_{пл} = 3422$ °C), Mo (2623 °C), V (1910 °C), Cr (1907 °C), Co (1495 °C), та іншими для утворення карбідів, нітридів і більш складних сполучень. Майже усі мають особливі властивості, але в операції легування, в першу чергу, важлива їх температура плавлення $t_{пл}$, яка майже у всіх вища ніж у головного конструкційного матеріалу – сталі ($t_{пл} \in 1370 \div 1530$ °C). Тому опромінювання виробів із сталі, на які нанесено на клейкій основі суміш порошків для модифікації їх приповерхового шару потребує набагато більшого рівня інтенсивності на поверхні та густини енергії W_E в обох шарах (модифікатору та матриці) для створення можливості рідинної дифузії з утворенням при охолодженні єдиного легуваного шару. Але цей режим опромінювання є занадто інтенсивним для матеріалу матриці, що завважає йому залишатися у рідинному стані для дифузійного проникнення в нього легуючих домішок, тобто він закипає та вибухово випаровується. При струминній подачі модифікатора у зону оплавлення на виробі він не здатний розплавитися на шляху до розплавленого шару матеріалу матриці, що б реалізувати рідинний вид дифузії, як найбільш ефективний спосіб насичення приповерхового шару. Тому таку операцію неможливо не тільки автоматизувати, але і ефективно реалізувати. Пропонується виконати деякі зміни у виконанні легування відповідно до схеми опромінювання, зображеної на рис. 6 а.

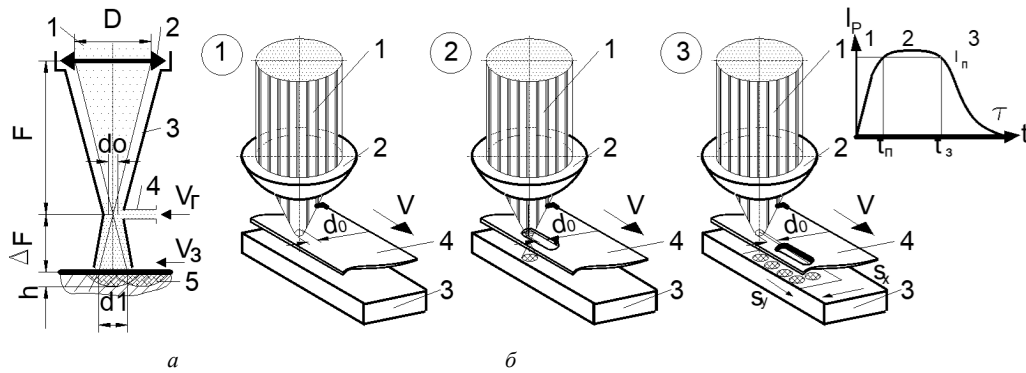


Рис. 6. Схеми формування легованого (а) та аморфного (б) шару на поверхні виробу (а: 1 – промінь; 2 – об’єктив; 3 – корпус різачку; 4 – штуцер; 5 – виріб), (б: 1 – промінь; 2 – об’єктив; 3 – виріб; 4 – фольга)

Для одночасного розплавлення різних за властивостями матеріалів використовується змінний рівень інтенсивності випромінювання уздовж каустики пучка випромінювання, перетвореного об’єктивом 2. Для цього застосовується корпус різачку 3, форма якого охоплює каустику променя l , на відстані ΔF у зафокальній області:

$$\Delta F = \frac{F d_0}{D} \left[\left(\frac{W_{\text{Понл}}^M}{W_{\text{Понл}}^3} \right)^{1/2} - 1 \right],$$

де: F – фокусна відстань об’єктива 2, d_0 – розмір попереку каустики ($d_0 = F\theta$), θ – кут розбіжності променя діаметром D , $W_{\text{Понл}}^M$, $W_{\text{Понл}}^3$ – густина потужності теплового джерела, створеного внаслідок лазерного опромінення, яка необхідна для оплавлення матеріалу модифікатора та заготовки відповідно. Розмір порошинок модифікатора d_1 , які вдуваються у каустику в найбільш інтенсивний її перетин повинен бути не більшим, ніж:

$$d_1 < 3,3 \frac{F}{D} \left(\frac{a\lambda}{V_{\text{П}}} \right)^{1/2},$$

для того, щоб на шляху до поверхні виробу (ΔF) вони встигли розплавитися (a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу модифікатора, λ – його теплопровідність, $V_{\text{П}}$ – швидкість транспортування порошинок газом. При заданій концентрації m модифікатора в поверхневому шарі виробу товщиною h модифікатор повинен подаватися струменем газу з його концентрацією:

$$k < \left(1 - \frac{L_{\text{пл}}^M \rho h}{L_{\text{пл}}^e m} \right)^{-1} 100\%,$$

де: ρ – щільність матеріалу модифікатора, $L_{\text{пл}}^M$, $L_{\text{пл}}^e$ – прихована теплота плавлення матеріалу модифікатора

та виробу, відповідно. При відносному русі променя та поверхні виробу зі швидкістю V_3 модифікатор повинен подаватися зі швидкістю $V_{\text{П}}$:

$$V_{\text{П}} = 400 \frac{d_1 V_3 m}{\pi d_0^2 \rho k}.$$

Таким чином, керуючи визначеними параметрами процесу легування d_1 , k , $V_{\text{П}}$ та V_3 автоматично досягається потрібний результат [6].

У другому способі (рис. 6 б) змінення властивостей поверхневого шару матеріалу виробу досягається його аморфізацією, тобто усуненням кристалічної структури з її якість та недолікми. Таке перетворення можна отримати, якщо на етапі формування решітки при охолодженні матеріалу виробу швидкість останнього буде перевищувати швидкість кристалізації. Локалізація зони опромінення, висока швидкість нагріву поверхневого шару і, як наслідок, його охолодження, априорі “гарантують” перетворення кристалічної структури в аморфний стан променем лазера. Але практичні спроби реалізації лазерної аморфізації не були успішними, в першу чергу, внаслідок прояви спадовості при перебудові структури, що вимагає підвищення швидкості її охолодження. Усунення цієї перепони досягнуто при формуванні аморфного шару з іншого матеріалу, який крім потрібних якостей має схильність до аморфізації (швидкість охолодження при кристалізації не перевищує 10^4 °C/c), але його кристалічна структура відрізняється від структури матриці, наприклад, сплав $Fe_{83}B_{17}$ із швидкістю $\sim 10^3$ °C/c, що суттєво менше швидкості охолодження приповерхневого шару конструкційних матеріалів після опромінення імпульсами мілісекундної тривалості, які більш енергетичні ніж короткі імпульси та більш здатні до потрібного режиму опромінення. Згідно із запропонованим способом [6] схильний до аморфізації матеріал у вигляді фольги (плівки) 4 розташовується над поверхнею виробу 3 із зазором 0.2 ± 0.4 мм на шляху променя l , енергія якого сконцентрована об’єктивом 2 на

її поверхню у зону діаметром d_0 з інтенсивністю $\sim 10^{5-6}$ Вт/см², достатньою для руйнування у режимі “плавлення – випаровування” та переносу рідкого матеріалу на холодну поверхню виробу. Якщо цим закінчити процедуру опромінення, то після переносу матеріалу на виріб діянням 1 та 2 ділянками імпульсу (графік на рис 8 б) через створений отвір в півці 4 на зону опромінення буде діяти частина 3 імпульсу тривалістю τ_3 хоча із низьким рівнем інтенсивності але буде завжати швидкому охолодженню зони та кристалізувати її структуру. Тому головною особливістю запропонованого способу є вимушений рух фольги 4 із швидкістю V :

$$d_0 / \left(\frac{T_{nl} - T_0}{V_{кр}} \right) \ln \left(\frac{T_{nl} - T_0}{T_k - T_0} \right) < V < \frac{E}{L_{пл} d_0 \delta (\tau - \tau_3)},$$

де: τ_3 – тривалість задньої частини імпульсу, T_{nl} , $T_{кр}$ – відповідно температура плавлення та кристалізації матеріалу фольги, T_0 – температура поверхні заготовки, $V_{кр}$ – критична швидкість охолодження (по кристалізації) матеріалу фольги, $L_{пл}$ – питома енергія його плавлення, δ – товщина фольги, τ – тривалість імпульсу, E – енергія останнього.

Якщо швидкість знаходиться у вказаних межах, а виріб нерухомий, то фольга встигне розплавитися і частково випаруватися діянням 1 та 2 ділянками імпульсу, що викличе перенос розплаву на поверхню виробу, а своїм тілом, яке не руйнується від дії задньої 3 ділянки імпульсу, швидко перекриє промінь в найменшому перетині каустики d_0 , перешкоджаючи попаданню енергії із 3 ділянки імпульсу на нанесений аморфний шар із матеріалу – донору. Таким чином, формується одинична зона аморфного шару. Для покриття їм усієї поверхні виробу необхідно в перервах між імпульсами зсувати заготовку на крок $S \leq d_0$ по чергово вздовж кожної із координат, повторюючи прохід опромінення через рухому фольгу. У цій формі реалізації операції автоматизація її окремих переходів не складне завдання.

Найбільш розповсюджена операція лазерного розкрою листової заготовки на виробі також викорис-

товує лазерний промінь для руйнування матеріалу шляхом розплавлення, як найдешевшим з погляду на енергетичні витрати: питома енергія плавлення для сталі у 75 разів менша ніж випаровування (84 та 6300 кДж/кг відповідно). Розмірний ефект в цьому разі досягається іншим носієм енергії: струменем газу. Така обробка має назву газолазерна і використовується не тільки в операціях розкрою, а також у деяких видах розмірної обробки. Головними чинниками керування процесом обробки, крім класичних для чисто лазерної (P – потужність випромінювання, просторові та розмірні характеристики променя: λ довжина хвилі, θ – кут розбіжності, D – його діаметр, E – енергетичні та часові властивості: τ та t у випадку його імпульсного постачання, тип та фокусна відстань F об’єктиву, що створює із нього обробляючий інструмент, V – швидкість контурного переміщення) стають: тип газу (повітря, O_2 , CO_2 , N_2 , Ar та He), його тиск. Режимне забезпечення операції в таких умовах ускладнюється, дорожчає, а час обробки стає тривалішим, і остання потребує експериментальних досліджень. Пропонується використати експрес метод для визначення рівня тих факторів, які не піддаються методам аналітичного проектування, тобто рівня потужності P , швидкості вирізання V та їх зв’язку з властивостями матеріалу заготовки та її товщини [7].

Експериментально визначено, що в режимі газолазерного вирізання з достатнім рівнем якості та продуктивності, потужність лазерного променя та швидкість операції залежать від матеріалу та товщини листової заготовки δ , однак, напрям та розмірні характеристики газового струменя, який витікає із заготовки має діаметр $d_3 \approx d_c$ (діаметр сопла в різаку 3) та зміщений відносно осі променя на величину $a = d_0/2$ (d_0 – діаметр променя на поверхні заготовки 7). Таким чином, за положенням струменя d_3 можна оцінювати хід операції та його корегувати впливом на V або P . Якщо навколо нього, або спереду та ззаду за напрямом швидкості V вирізання розташувати два пневматичних чутника 4 і 5, то за їх спрацюванням можна слідкувати за оптимальністю процесу вирізання та впливати на неї

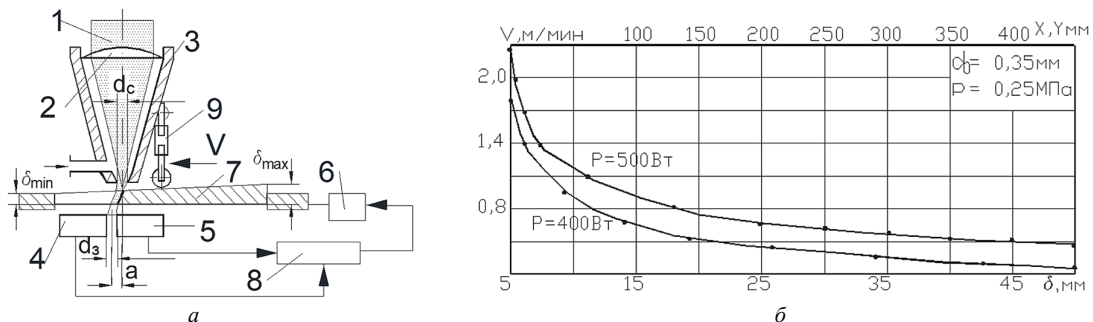


Рис. 7. Схема налагодження ЛТУ для експрес методу визначення режиму обробки (а: 1 – промінь, 2 – об’єктив, 3 – різак, 4, 5 – чутники пневматичні, 6 – привід столу з заготовкою 7, 8 – блок вимірвальний, 9 – упор з кулькою; б: графіки отриманих залежностей

шляхом корегування параметрів операції P і (або) V (елементи δ та δ). Керування останньою величиною простіше та оперативніше ніж потужністю. На рис. 7 а зображена схема ЛТУ в стані її використання для визначення режимів обробки V та P при управлінні процесом розрізання клиноподібної заготовки із дубу з товщиною $\delta_{\min} = 5$ мм та $\delta_{\max} = 50$ мм, а на рис. 7 б – отримані залежності $V = f(P, \delta)$ при виконанні цієї операції променем CO_2 лазера на двох рівнях його потужності 400 та 500 Вт. За цією схемою працює ЛТУ при виконанні розрізання заготовки постійної товщини [7] з автоматичним виправленням режиму обробки за раптовим змінням (коливанням) параметрів якихось інших чинників, що впливають на положення струменю технологічного газу при наскрізному прорізання заготовки. Режим газолазерної обробки розповсюдився завдяки його корисним можливостям і на інші види операцій лазерної обробки.

Четвертий перехід. Завдання автоматичного керування процесом обробки найчастіше виникають при ускладненні технологічної операції як за змістом, так і за вимогами до їх результатів. Зазвичай такі операції найбільш складні за проектуванням, обранням технологічного обладнання, технологічним його оснащенням (приспособуваннями) та реалізацією. Останній етап оцінюється багатокритеріально, тобто нормуванням багатьох показників операції: якості (точність розмірів, форми та розташування складових елементів виробу), складності реалізації, продуктивності та собівартості. До таких операцій відносяться *розмірна (прецизійна) обробка, гравірування (поверхневе та об'ємне), оздоблення поверхні та формування не ній регулярного мікрорельєфу*. Такі операції базуються на керованому видаленні “зайвого” матеріалу із заготовки тому виконуються “гострим” інструментом високої енергетичної інтенсивності $I_p \geq 10^7$ Вт/см² та порціями короткої тривалості $\tau \leq 10^{-6}$ с.

Перше місце у цьому списку напрямів автоматизації повинне займати завдання *автоматизації якісних вимог* тому, що без їх виконання технологічна операція втрачає сенс. Ясно, що її рішення може бути досягнуто обранням оптимальної схеми обробки, а також режимним регламентом. Останній шлях є найбільш ефективним та логічним, але часто недосяжним внаслідок конкуренції якісних вимог з іншими, такими ж важливими. Тому розглянемо по черзі можливості автоматизації процесу обробки з позиції виконання вимог до форми результату обробки (поперек, повздовжнього виду оброблених отворів, лунок, пазів та різів), далі ступеня відтворюваності їх розмірів (точність) і можливості комплексного рішення.

Якщо поперек більшості розмірних елементів виробів (отворів, лунок, пазів та різів) набуває форму або копіюванням попереку інструменту або ще додатковим відносним переміщенням останнього та заготовки шляхом сканування або робочої подачі, то у формуванні їх повздовжньої форми більшу роль віді-

рають початкові умови опромінення (розташування у каустиці перетвореного оптичним елементом променя) та планове їх зміння протягом операції. Величина, напрям та час таких змін може виконуватися під час опромінення, в перервах між порціями енергії при багатоімпульсній обробці або при нагляді за поточним результатом обробки. Можливість оперативного зміння форми та розмірів інструменту із лазерного променя (це прояв гнучкості останнього, як заготовки) дозволяють виконувати зміни умов опромінення під час виконання переходу операції, тобто на будь-якому її етапі.

Які вимоги до повздовжньої форми переважають при обробці глибоких отворів $h \geq 5d$: це отвори з конусоподібністю $k = D - d$ (D, d – більший та менший розмір діаметру отвору) або циліндричні, розмір яких задається кресленням у вигляді $d \pm It(d)/2$, де $It(d)$ – допуск на розмір отвору, який необхідно витримувати вздовж довжини (глибини) отвору. Операційні ескізи виготовлення таких отворів відрізняються за схемою відносного переміщення інструменту та заготовки. Конічні отвори обробляються зі сторони більшого розміру та отримують свою форму шляхом копіювання ділянки каустики перетвореного променя при її заглибленні у заготовку, при цьому його інтенсивність повинна перевищувати критичний для металів рівень $I_p \geq 10^7$ Вт/см² вздовж задіяної ділянки каустики.

На рис. 8 зображено ЛУ з приспособуванням для обробки конусних отворів в автоматичному режимі в заготовках у вигляді кулі [3]. Початок реалізації процесу обробки починається з обрання операційного ескізу, режиму опромінення та параметрів інструменту із лазерного променя. Заготовка 4 (кулька системи омивання лобового скла автомобіля) розташовується в отворі приспособування, яке закріплюється на столі ЛУ. Повздовжня форма отвору близька до конічної з меншим діаметром d та зверненим до променя D , тобто з конусоподібністю k :

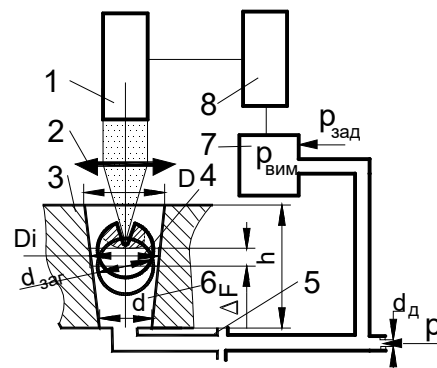


Рис. 8. Лазерна установка для обробки конусних отворів (1 – лазер, 2 – об'єктив, 3 – стіл з отвором для утримання заготовки 4 під час обробки, 5 – штуцер для подачі повітря, 6 – отвір для розташування заготовки, 7 – чутник пневматичний, 8 – блок керування лазером)

$$k = D - d = \frac{l}{\Delta F} \left[\left(\frac{4\Delta G}{\pi p_i} + D_i^2 \right)^{1/2} \right] - D_i,$$

де: γ – питома вага матеріалу заготовки, D_i – діаметр отвору b на рівні розташування заготовки, ΔF – зміщення заготовки 4 назустріч променю дією на неї газом (повітрям), який подається через менший отвір в столі 3 під заготовку, внаслідок зменшення її ваги на ΔG черговим імпульсом випромінювання, що порушує рівновагу сил, які діють на заготовку:

$$p_i \frac{\pi d_{\text{заг}}^2}{4} = G_{\text{заг}} = \frac{\pi d_{\text{заг}}^3}{6} \gamma, \text{ або } \frac{p_i}{2} = \frac{d_{\text{заг}} \gamma}{3},$$

де: p_i – тиск повітря під кулькою, який визначається тиском p на вході в систему та його витратами через кільцевий зазор $D_i - d_{\text{заг}}$, $G_{\text{заг}}$ – вага кульки.

Перед початком обробки об'єктів 2 розташовують над заготовкою 4 тим місцем каустики, яке має обраний діаметр на поверхні заготовки, яка підважена у отворі b дією тиску струменя. Перший імпульс випромінювання утворює в заготовці лунку $d_0 \times h_0$ та при цьому зменшує вагу останньої до величини:

$$G_{\text{заг}}^1 = \frac{\pi \gamma}{2} \left(\frac{d_{\text{заг}}^3}{3} - \frac{d_0^2 h_0}{2} \right).$$

Баланс сил, діючих на заготовку, порушується та вона зміщується вгору, назустріч променю на величину ΔF коли зазор навколо збільшиться та приведе до нового балансу зменшення тиску під заготовкою до рівня p_{i+1} :

$$p_{i+1} = \frac{2\gamma}{d_e^2} \left(\frac{d_{\text{заг}}^3}{3} - \frac{d_0^2 h_0}{2} \right).$$

Величина ΔF залежить від пневматичної характеристики системи (величин d_e, p) та конусоподібності отвору b . Переміщення заготовки в каустиці променя призводить до зміння діаметру отвору, що обробляється,

що надає їй конусність та при визначеному зменшенні тиску під нею до рівня $p_{\text{зад}}$ в чутнику 7 останнім виконується через блок керування лазером зупинка ЛУ, тобто кінець операції. Треба зауважити, що зміщення центру тяжіння та створення навколо входу обробленого отвору грату та обурення цим повітряного струменя навколо гирла отвору утримують заготовку в незмінному положенні в радіальному напрямку.

Подібним чином формується заданий повздовжній профіль отвору, наприклад, при виготовленні волюки або філь'єри із прозорого для променя матеріалу алмазу, сапфіру тощо. На рис. 9 зображено схеми ЛУ для виконання подібних операцій [6]: a – для прозорих матеріалів які при нагріванні до випаровування змінюють свої властивості та збільшують коефіцієнт поглинання A випромінювання лазера, обраної довжини хвилі: b – для звичайних прозорих матеріалів [8]. Прикладом перших є алмаз, який з початком руйнування змінює свою кристалічну структуру та обертається у продукт горіння – сажу з коефіцієнтом $A_{1,06} = 0,77$, $A_{10,6} = 0,51$. З рисунку зрозуміло, що обробка починається з нижньої по відношенні до променя поверхні заготовки, на яку концентрують через її тіло енергію імпульсу випромінювання. Остання поглинається поверхнею столу 9 (а) та домішками в розчині із рідкого мастилу 14 (б), що подається до нижньої поверхні заготовки 3 , нагріває її і руйнує. Мікро вибухи, що супроводжують руйнування, збуджують суміш 14 , що заважає утворенню осаду. За схемою а поверхня отвору в заготовці графітується, що сприяє підтриманню високого рівня поглинання, а у схемі б – поглинальна суміш слідує за зміщенням дна отвору завдячуючи перевищенню його рівня висоти заготовки на величину H . Перевагою такої схеми є відсутність ерозійного факелу зі сторони надходження енергії променя. Замовлена циліндричність отвору гарантується підтриманням початкових умов опромінення, тобто розміру зони опромінення та інтенсивністю в її межах протягом операції. Це досягається слідкуванням за положенням дна отвору за допомогою променя b лазера 5 , який постій-

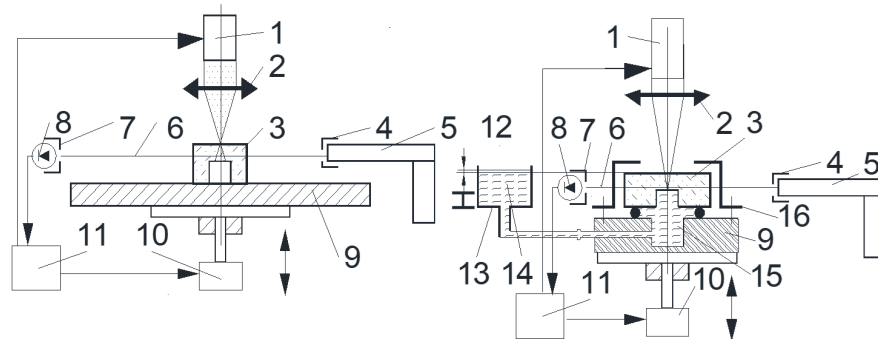


Рис. 9. Схеми ЛУ для розмірної обробки виробів з прозорих матеріалів (a – алмаз, b – сапфір, рубін тощо), (1 – лазер, 2 – об'єктив, 3 – заготовка, $4, 7$ – діафрагма, 5 – додатковий лазер ($He-Ne$), 6 – промінь додаткового лазера, 8 – фото чутник, 9 – стіл ЛУ, 10 – привод переміщення столу, 11 – процесор, 12 – ємність 13 з поглинаючим розчином 14 , 15 – отвір в столі ЛУ, 16 – елемент утримання заготовки)

но просвічує тіло заготовки безпосередньо над дном отвору. При його перекритті перерва в засвіченні чутника 8 дає наказ процесору 11 запускати привод опускання столу із заготовкою до відновлення освітленості променем 6 чутника 8. Автоматизація полягає в тому, що початок та кінець процесу обробки на налагодженому обладнанні є єдиними діями оператора, а участь в процесі обробки не потрібна. Треба додати, якщо є потреба в отриманні отворів більш складної повздовжньої форми то це можливо при програмному управлінні умовами опромінення (діаметром її зони) Для обробки циліндричних отворів в заготовках із конструкційних матеріалів, які не прозорі для усіх лазерних променів, крім гразерів, які ще не існують, використовують обробку наскрізних отворів з обох сторін, якщо товщина стінки, де вони розташовані, перевищує подвійну довжину Релея у фокальній області об'єктиву тобто "глибину різкості" оптичної системи. Якщо у схемі обробки використати одночасне формування отвору з обох сторін, то конструкція ЛУ буде достатньо складною, як і ускладнюється процедура її налагодження. Тому перспективною здається схема із почерговою обробкою з обох сторін, але потрібне рішення двох проблем: перша як встановлювати чергу обробки з кожної сторони, що б наблизити отвір до циліндричності та друга – як досягти збіг осей лунок, які обробляються з кожної сторони. На рис. 10 зображена схема реалізації технологічної операції [9]. Остання призначена для обробки простих за формою заготовок (кулька, диск, стакан, втулка), які мають вісь симетрії. Заготовка 1 (кулька омивача вітрового скла автомобіля притиснута або тимчасово приклеєна до двох цапф 2 підшипників на повітряній подушці 3. Лазерний промінь, перетворений в інструмент об'єктивом 4, з відповідними параметрами направляється на заготовку знизу. Операція виконується в багато імпульсному режимі. Опори на повітряній подушці зменшують практично до "0" сили тертя в парі цапф 2 та підшипник 3. це потрібно для зниження крутного моменту обертання системи з двох цапф 2 та заготовки 1 навколо загальної осі. Перший (I) імпульс (положення 1) створює лунку зі сторони низу кульки, що викликає порушення баланс сил, діючих на систему: зміщення центру ваги на величину e_1 створює крутний момент, який дорівнював добутку вази видаленого матеріалу на e_1 (положення 1). Другий (II) імпульс подається після повороту системи на пів обороту, закінчення якого визначається чутником 5 (положення 2), що гарантує співвісне розташування лунки з протилежної сторони заготовки 1. Цей імпульс повернув положення центру ваги на вісь системи, для наступного обертання не має крутного моменту ($e = 0$), тому наступний, третій (III) імпульс слідує за другим (II), поглиблюючи лунку, чим знову створює зміщення центру ваги до величини $e_2 > e_1$ та поворот на пів обороту, тобто в положення 1, в якому четвертий імпульс (IV) поглиблює лунку. Така черета імпульсів приведе до формування наскрізного отвору з

покращеною повздовжньою формою. Які переваги має ця схема перед іншими? Декілька: по перше поворот заготовки після обробки з однієї сторони на іншу виконується автоматично, по друге, вчасно: по мірі заглиблення з однієї сторони на більшу величину виконується зміна положення заготовки її обертанням на пів обороту.

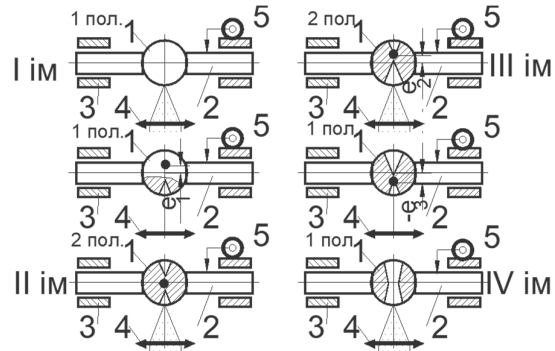


Рис. 10. Схема реалізації операції обробки отворів циліндричної форми з почерговим опромінюванням з двох сторін, (1 – заготовка (кулька), 2 – цапфа, 3 – повітряний підшипник, 4 – об'єктив, 5 – чутник руху (обертання))

Четвертий перехід. Це найбільш важкий, важливий та цікавий етап автоматизації технологічних систем або процесів у вигляді операцій. Важкий – внаслідок того, що точність результатів залежить не тільки від проєктанта, спеціаліста з налагодження та оператора, технологічного оснащення та обладнання, а також від складності об'єкту керування – механізмів, досягнення результату, діяння технологічної системи. Розмірна обробка або за іншими назвами – прецизійна, супроводжується високими вимогами до відтворюваності результатів, це в додаток до їх мініатюрності. Тому автоматизація способів та засобів їх отримання може суттєво підняти загальну якість виробів до того ж за дешево. Складові процедури автоматизації повинні бути направлені на отримання достовірної інформації про поточний хід процесу, обрання методу та напрямку корекції останнього та створення відповідних пристосувань для ефективної їх реалізації. Зміст автоматизації та її реалізація залежать від конкретних умов завдання: виду та розмірів заготовки, елемента, що обробляється (отвір, лунка, паз, різ тощо), її матеріалу, кількості в партії та кількість останніх. Тому почнемо з простих завдань, невеликих партій та спрощених вимог.

При лазерній обробці оптичних матеріалів типу скла К8 або кварцового скло з високою прозорістю та якісною обробкою поверхонь заготовки імпульсами мікросекундної тривалості при розмірах отвору до $0,1 \div 0,3$ мм існує проблема для випромінювання ультрафіолетового, видимого та ближнього (довжина хвилі ≤ 1.5 мкм) інфрачервоного діапазона його поглинання матеріалом. Усі методи "почорніння" поверхні (флекс-

сографічними чорнилами, сажею, придання їй шорсткості до $R_z > 3.2 \div 6.3$ мкм) після її опромінення відновлюють свої вихідні властивості. ЛУ, яка зображена на рис. 11 а, реалізує спосіб обробки подібних матеріалів [10]. Промінь від лазера 1, сконцентрований об'єктивом 2 в зону опромінення заготовки 6, по перше, формує отвір у фользі 3, яка розташована над поверхнею заготовки на відстані $0,3 \div 0,4$ м, а вдруге, продукти ерозії матеріалу фольги переносять на останню, вплавляючи їх в поверхню внаслідок високої температури та кінетичної енергії. Створюються острівці переплаву із склом, які непрозорі для променя. Рештки (невеликі) енергії променя частково досягають через тіло заготовки та захисний фільтр 8 до фото чутника 9, який виробляє фото струм, який подається та аналізується процесором 4. Поки зона опромінення залишається почорненою фольга не рухається і наступний (наступні) імпульси енергії поглинаються створеними ділянками переплаву та вибухоподібно руйнує їх, видаляючи з поверхні заготовки. Якщо остаточна енергія недостатня для спрацювання процесора 4 і фольга нерухома, то подаються нові імпульси через отвір у фользі, тобто обробка продовжується. Якщо дно лунки, яка утворилася, стає прозорою, то збільшений фото струм запускає привод 10 переміщення фольги 3 з котушки 5 на крок який дорівнює діаметру отвору в ній d . Такі переходи продовжуються до формування наскрізного його каналу поки освітленість фото чутника 9 не досягне його максимального рівня, що закінчує операцію. Через процесор 4. Поверхня стінок отвору потребує розмірного та оздоблювального доопрацювання, наприклад, із досвіду впровадження – шліфуванням

шовковою ниткою з алмазною пастою. В наведеному способі обробки метою було виготовлення якісних отворів в кубіку $10 \times 10 \times 10$ мм для лазерних гіроскопів, при чому автоматизована була лише частина операції. Для цього використовується цуг однакових імпульсів, тобто умови опромінення залишаються стабільними, а потрібна циліндричність отвору досягається незмінністю розміру зони опромінення внаслідок прямого поглинання їх енергії лише на дні лунки при умові підтримання достатнього рівня інтенсивності, незважаючи на недостатню глибину різкості оптичної системи.

Якщо є потреба отримання також одиничних отворів в заготовках простої форми: диск, пластина, кулька однакової товщини, то однакові за розміром отвори, зазвичай досягаються приблизно однаковою кількістю імпульсів ± 1 імпульс, як оздоблювальний для вигладжування його каналу. Таку операцію можна реалізувати, особливо для невеликих партій виробів, за рахунок використання універсального обладнання при його частковій автоматизації, при чому остання торкається головного: контролю поточного результату обробки та визначення її кінця. На рис. 11 б зображена схема пристрою та позначено алгоритм виконання операції. Які зміни внесені до універсальної ЛУ? Корпус 10 об'єктиву з лінзою 2 перетворено у поршень пневмоциліндру шляхом додання до нього двох ущільнень 6 у вигляді гумових кілець та нерухомого закріплення його на шляху променя лазера 1. Корпус пневмоциліндру 4 має відповідний діаметр D для щільного розташування в ньому 'поршня' 10 та висоту H , яка перевищує найбільшу відстань можливого розташування заготов-

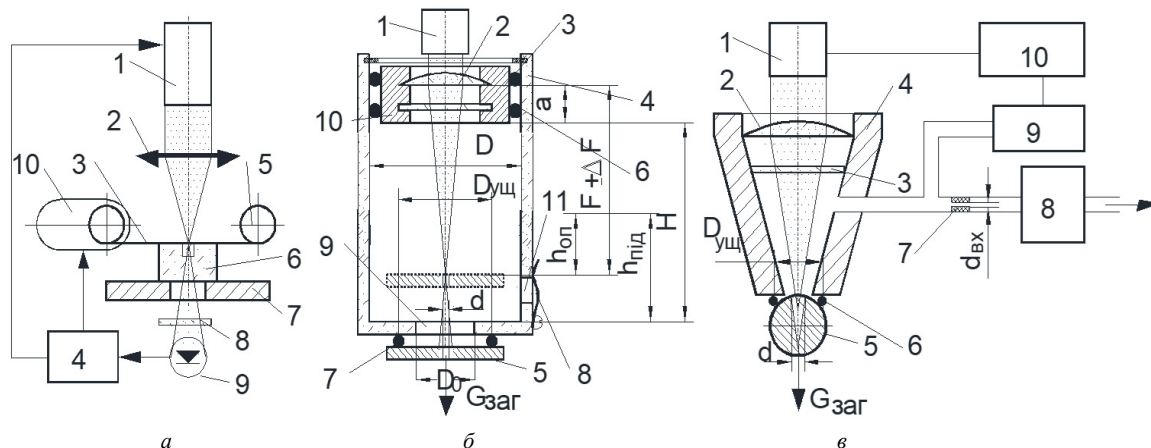


Рис. 11. Схеми лазерних установок з автоматичним керуванням процесу обробки отворів: (а – в заготовках із прозорих матеріалів, б – з можливістю доопрацювання додатковим імпульсом, в – з доопрацюванням отвору до заданого розміру, (а: 1 – лазер, 2 – об'єктив, 3 – фольга з непрозорого матеріалу, 4 – процесор, 5 – котушка фольги, 6 – заготовка, 7 – стіл, 8 – фільтр захисний, 9 – фото чутник, 10 – привод переміщення фольги; б: 1 – лазер, 2 – об'єктив, 3 – захисне скло, 4 – корпус пневматичного циліндру, 5 – заготовка, 6 – ущільнення корпусу 10 об'єктиву, 7 – ущільнення заготовки, 8 – зворотний пневматичний клапан, 9, 11 – отвори в корпусі 4), в: 1 – лазер, 2 – об'єктив, 3 – захисне скло, 4 – корпус, 5 – заготовка, 6 – ущільнення, 7 – дросель, 8 – вакуум насос, 9 – чутник тиску, 10 – процесор)

ки 5 в каустиці променя, створеною об'єктивом з лінзою 2. Циліндр має такі особливості конструкції: прозорий матеріал з нанесеною повздовжньою міліметровою шкалою, пружне кільце 3 для утримання циліндру від падіння з нижнього його положення; на бічній поверхні створено зворотній клапан 8 на отворі 11, а в його торцевій стінці зроблено отвір 9, на зовнішній стінці навколо нього приклеєно кільцеве ущільнення 7 з діаметром $D_{\text{ущ}}$, меншим ніж зовнішній розмір заготовки 5, яка важить $G_{\text{заг}}$. Обробка починається з щільного ручного притискання заготовки 5 до ущільнення, орієнтуючи її відносно осі променя (для налагодження рекомендується заміна робочого променя на малопотужний промінь видимого діапазону He-Ne або напівпровідникового лазера).

Усього треба виконати наступні кроки [3]:

- опустити циліндр 4 в нижнє положення, тобто на всю його висоту H ;
- підняти циліндр 4 з нижнього положення на розрахункову висоту $h_{\text{нід}}$, відрховуючи відстань за шкалою, нанесеною на прозору стінку циліндру 4;
- притулити до ущільнення 7 заготовку 5 для герметизації порожнини циліндру 4;
- підтримуючи заготовку 5 у притиснутому до ущільнення 7 положенні перемістити її разом із стаканом 4 в бік збільшення об'єму порожнини стакана 4, тобто опустити на визначену за розрахунком відстань $h_{\text{он}}$, відрховуючи її за шкалою на стінці стакана 4 від ділення, яке відповідає попередньому положенню стакана 4;
- закріпити в цьому положенні стакан 4 відносно оправки 10 лінзи 2.

Результатом підготовленого таким чином пристрою для виконання обробки отвору заданого розміру d є утримання заготовки в притиснутому до ущільнення 7 положенні створеним в порожнині вакуумом p' , що разом з атмосферним тиском $p > p'$ утворює силу $N = (p - p')\pi D_{\text{ущ}}^2/4$, яка повинна бути більшою ваги заготовки $G_{\text{заг}}$. Якщо значення величин H , $h_{\text{нід}}$, $h_{\text{он}}$ вибрати з урахуванням ваги заготовки $G_{\text{заг}}$, її площі ущільнення $S_{\text{ущ}} = \pi D_{\text{ущ}}^2/4$, та розміру D і вибраних умов опромінення $F \pm \Delta F$, то перед обробкою заготовка повинна бути розташованою в розрахунковому місці каустики перетвореного об'єктивом 2 пучка випромінювання. При обробці крізного отвору імпульсами, які надходять з частотою f_1 , можна створити такі умови обробки, за якими в разі формування отвору, меншого заданого розміру, убування вакууму в порожнині циліндру 4 внаслідок підсосу повітря через оброблений отвір, із швидкістю w_0 не викличе падіння заготовки деякий час t , доки сила притиску заготовки N не порівняється з її вагою. В цьому разі такий отвір можна доопрацювати до заданого розміру, якщо черговий імпульс випромінювання надійде з періодом t_1 , меншим ніж тривалість утримання заготовки t . В разі обробки отвору більшого, ніж мінімальний розмір, заготовка відпаде від стакану 4 раніше, ніж має надійти черговий імпульс,

що не приведе до збільшення розміру за межі поля допуску. Внаслідок такої організації операції має зменшитися поле розсіяння розмірів оброблених отворів за рахунок виключення отворів з меншими ніж номінальний розмір діаметрами.

Значення величин $h_{\text{нід}}$, $h_{\text{он}}$ Δp і w_0 розраховуються за наступними залежностями:

$$h_{\text{нід}} = H + \frac{p - \Delta p}{p} \left[\frac{4w_0 S_0}{\pi f_1 D^2} - (F \pm \Delta F) + a \right],$$

$$h_{\text{он}} = h'_{\text{он}} + h''_{\text{он}} = \frac{\Delta p}{p - \Delta p} (H - h_{\text{нід}}) + \frac{4w_0 S_0}{\pi D^2 f_1},$$

де: $\Delta p = G/S_s$; $S_0 = \pi d^2/4$ (d – діаметр обробленого отвору); a – конструктивний розмір оправки 10 (рис. 11 б); w_0 – швидкість протікання повітря через отвір розміром d при перепаді тисків Δp :

$$w_0 = \sqrt{2 \frac{\kappa}{\kappa - 1} p V \left[1 - \frac{p - \Delta p}{p} \right]^{k-1/k}},$$

де: k – показник адіабати (для повітря $k = 1,4$); $V = 1/\rho$ – питомий об'єм повітря ($\rho = 1,293 \text{ кг/м}^3$).

З підвищенням вимог до точності діаметрального розміру отворів схема обробки [11] та шлях оцінення поточного її результату залишається такими ж, як у попередній схемі, але надана можливість для досягнення розміру отвору заданого значення із зниженням можливості отримання виправного браку ($d_i < d - It_d/2$ – не доопрацьований отвір) у випадку раннього відокремлення заготовки 5 від ущільнювача 7 або невивиправного ($d_i > d + It_d/2$ – останній додатковий імпульс надмірно збільшив розмір отвору) внаслідок випадкових порушень режиму опромінення. Це досягається зменшенням дискретності впливу чергового імпульсу на розмір оброблювального отвору шляхом використання більшої кількості імпульсів з меншою енергією. В такому випадку при тій же ймовірності випадкових порушень режиму обробки менш енергетичний імпульс створить менший приріст розміру. На рис. 11 в видно, що для створення та підтримання потрібного рівня вакууму, який відповідає точному розміру отвору, коли операція повинна закінчуватися, використано вакуум насос 8, який працює через дросель 7 для підтримання нормативного рівня вакууму, необхідного для утримання заготовки з розміром отвору, в межах поля допуску

Закінчення операції визначається вакуумметром 9 після відокремлення заготовки 5 від ущільнення 6 подачею сигналу на процесор 10.

При необхідності обробки якісних отворів в тонких заготовках ($\delta \ll d/2$) обрана схема керування їх розміром не спрацьовує тому, що наскрізний отвір створений першим (першими) імпульсами не може бути збільшений наступними внаслідок відсутності матеріалу заготовки в межах центральної частини отвору, де

промінь має найбільшу інтенсивність для усіх видів її розподілу у його попереку (від TEM_{00} до TEM_{mn} , де m і n – індекси поперечних мод > 1), але відсутній матеріал для поглинання його електромагнітної енергії, перетворення її в теплове джерел і термічний вплив на матеріал. Тому аналогічно з механообробкою потрібне свердло більшого діаметру – для збільшення розміру отвору. Але у відмінності з тією ж обробкою лазерний промінь, як гнучка заготовка для інструменту, дозволяє це робити, не перериваючи процес обробки. Тобто автоматизація такої обробки переходить у більш високій за рівнем статус адаптивної організації технологічної операції. На рис 12 зображені три варіанти таких схем: *a* – для обробки отвору в тонких заготовках простої форми; *b* – в заготовках будь-якої форми; *в* – в листових заготовках з будь-якою кількістю отворів. Загальною особливістю схем є використання пневматики для активного контролю розміру отвору під час обробки. Останній послуговує витратним соплом для випуску повітря із вимірювальної камери, яка створюється під стінкою заготовки (*a*, *b*) або над нею (*в*).

У випадку (*a*) дозована кількість повітря з визначеним тиском p подається через вхідну діафрагму 11 під заготовку 3, яка встановлена в камері стакану 9 та притиснута до ущільнення 7 пружинами 5 і 6 з обох сторін. Сила притиску з кожної сторони залежить від характеристик пружин та пружності ущільнення 7 і регулюється кришкою 4. Коли подається повітря на заготовку тисне знизу додаткова сила, яка дорівнює добутку тиску на площу її ущільненої частини. Під дією цих чотирьох сил заготовка повинна зайняти положення у визначеному в каустиці променя місці F або $F \pm \Delta F$. Тиск в вимірювальній камері контролюється пневмо чутником 8, підключеному до блоку живлення 10 ла-

зера 1. При подачі імпульсів енергії та формуванні наскрізного отвору розміром d_i через нього виходить повітря, що зменшує тиск у вимірювальній камері, порушується баланс сил, діючих на заготовку і вона зміщується вздовж каустики променя у бік збільшення розміру її попереку тобто вниз відповідно до схеми на рисунку. Якщо за визначену кількість імпульсів отвір не надбає заданого розміру, то чергові “зайві” імпульси енергії, маючи більший діаметр на поверхні заготовки, доопрацюють оброблювальний отвір до заданого розміру $d_n = d + \Delta d$. Коли це станеться, то пневмо чутник 8 спрацює що зупинить операцію. Як керувати чуйністю системи, тобто точністю отримання розміру треба дивитися в опису [3].

Схема на рис. 12 *b* працює в попередньому режимі, але без вимоги на просту конфігурацію заготовки, хоча вона залишається у системі вимірювальної камери, її участь зводиться лише у формуванні інформаційного сигналу, а не в його виправленні для видалення недоліків обробки тобто із суб’єкту процесу перетворена в об’єкт, над яким виконують процедури. Заготовка виконує роль нерухокої кришки камери, а отвір на етапі доопрацювання отвору збільшується переміщенням каустики променя в бік більшого її перетину шляхом руху об’єктиву 2 за допомогою його утримання важелем 12 на торці штоку поршня пневмоциліндру 5.

Подібна схема технологічної операції (рис. 12 *в*) реалізована для обробки системи отворів в листових заготовках [3], але для управління розміром каустики під час обробки кожного з отворів об’єктив 2 рухається вздовж осі променя в залежності від тиску у вимірювальній камері 9, де він виконує обов’язки поршня, будучи забезпечений ущільненням 7, у пневмоциліндрі в

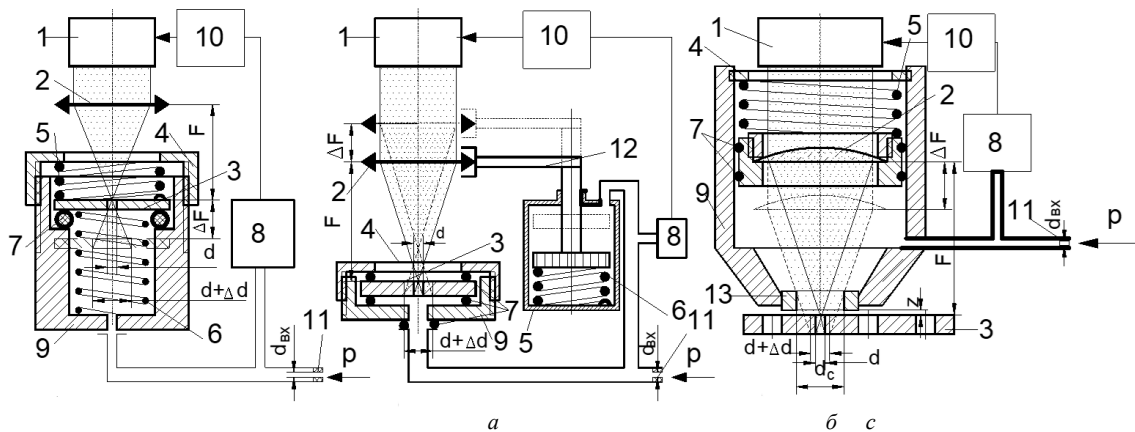


Рис. 12. Схеми пристосувань для реалізації технологічних операцій обробки отворів з адаптивною організацією, (*a* – обробка отворів в тонких заготовках простої форми з одним отвором; *b* – в заготовках будь-якої форми з одним отвором; *в* – в листових заготовках з будь-якою кількістю отворів), (*a*: 1 – лазер, 2 – об’єктив, 3 – заготовка, 4 – кришка камери, 5, 6 – пружини, 7 – ущільнення, 8 – чутник тиску, 9 – корпус вимірювальної камери, 10 – процесор, 11 – вхідна діафрагма; *b*: 5 – пневмоциліндр, 12 – важіль; *в*: 4 – пружна шайба, 12 – сопло

корпусі 9. Стиснуте повітря з керованими характеристиками (тиском p та витратами через вхідну діафрагму 11) подається в корпус 9, а витікає звідти через сопло 12 діаметром $d_c > d$ у бік заготовки співвісно з лазерним променем. Вимірювальний тиск в камері 9 p_i буде залежати від подальшого руху повітря тобто від діаметру отвору, що обробляється, та зазору між торцем сопла 12 та поверхнею заготовки δ : $S_{\text{виг}} = \pi d^2/5 + \pi d_c \delta$. Ця залежність тиску p_i в камері 9 від змінного параметру d при постійних рівнях інших дозволяє реалізувати обраний шлях управління точністю оброблених розмірів переміщенням каустики в бік збільшення розміру його перетину на поверхні заготовки без зовнішнього втручання в хід процесу обробки.

Хоча представлена схема може використовуватися для обробки отворів в заготовках різної товщини як видно із рис. 13, її можливості більш проявляються для тонких заготовок, в яких отвори формуються 2–3 імпульсами випромінювання. Графіки показують, що для тонких заготовок $\delta = 0,1$ мм отвори були збільшені з 0,8 мм майже до 1,0 мм, для $\delta = 0,2$ мм – з 0,59 мм до 0,81, для $\delta = 0,4$ мм: з 0,53 мм до 0,65 мм, а при $\delta = 2,0$ мм: з 0,3 мм до 0,5. При використанні адаптивної форми організації операції (АРО), тоді як багато імпульсна обробка (БІО) для $\delta = 0,1$ мм до $\delta = 0,4$ мм не дозволила помітно збільшити розмір, Лише для $\delta = 2,0$ мм отвір $\varnothing 0,3$ мм збільшили до $\varnothing 0,36$ мм.

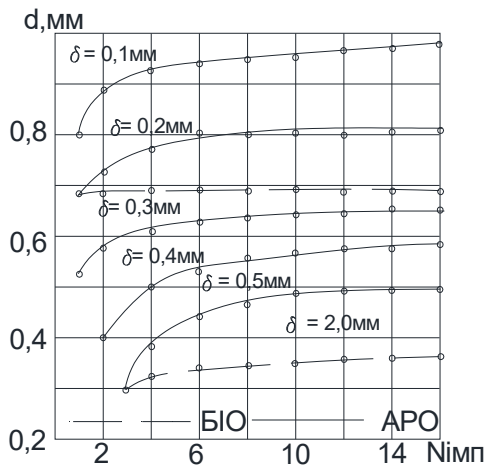


Рис. 13. Розміри отворів, оброблених в заготовках із сталі 1Х18Н10Т різної товщини

І в кінці статті наведемо приклад повної автоматизації операції формування конічних отворів в кульках із сталі ШХ15 для їх використання в якості сопел системи омивання вітрового скла автомобіля [12]. Потреба виникла при спробі використання для цього бракованих кульок з виробництва підшипників після повного циклу їх обробки, тобто гартування, шліфування, полірування та бракування. Лазерна обробка була визначена найефективнішою за якістю, продуктивністю

та собівартістю серед циклу послідовних операцій механообробки, електроерозійної, електрохімічної, ультразвукової та електронно променевої.

На рис. 14 зображена схема автоматичної ЛТУ, при адаптивній організації технологічної операції. Заготовки (кульки діаметром 6 мм) завантажуються в бункер 13 із слизом, направленим до штоку 6 пневмоциліндру 7. Перша заготовка завантажується в заглиблення на торці штоку 6, який утримує інші кульки в бункері 13. Вона перекриває отвір у штоку діаметром $d_{\text{шт}} < [4G_3 / \pi p]^{1/2}$, (де G_3 – вага заготовки, p – тиск, що створюється насосом), і якщо рівень тиску p бути достатнім для підйому поршня із заготовкою $p \geq (G_n + G_3) / \pi D_3^2$, (G_n – вага поршня з штоком), то заготовка підіймається вгору у напрямку до вимірювальної камери 4 з ущільненням 5 на торці. У міру наближення заготовки до камери зменшується подача повітря в пневмоциліндр 7, оскільки він нагнітається насосом через патрубок із камери 4. Дросель 9 в цей період відкрито приводом 10, який керується датчиком тиску 11. Заготовка підтягується вакуумом до ущільнення 5, відокремлюючи його від штока на відстань Δ .

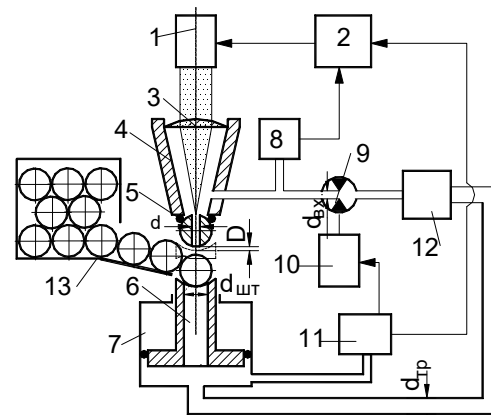


Рис. 14. Лазерна установка для обробки отворів в кульках в автоматичному режимі, (1 – лазер, 2 – блок живлення лазера, 3 – об'єктив, 4 – вимірювальна камера, 5 – манжета, 6 – шток пневмоциліндру 7, 8 – цупник тиску у вимірювальній камері, 9 – дросель, 10 – привід дроселя, 11 – цупник тиску в пневмоциліндрі, 12 – насос, 13 – бункер із слизом)

Витрати повітря з-під неї збільшуються, тиск під поршнем падає і під дією власної ваги він опускається і при його нижньому положенні місце на штоку займає чергова заготовка. При падінні тиску датчик 11 перемикає дросель 9 на розмір отвору в ньому d_{ex} :

$$d_{\text{ex}} = d \left[1 - \frac{G_3}{S_3 (p_a - p_b)} \right]^{-\frac{1}{2}},$$

де: d – діаметр оброблювального отвору, S_3 – площа заготовки, що ущільнена манжетою 5, p_a – атмосферний тиск, p_v – рівень вакууму. При досягненні розрахункового рівня p_v у вимірювальній камері 4 чутником тиску 8 вмикається блок живлення 2 лазера 1, починається обробка. Продукти лазерної ерозії висмоктуються насосом 12 і при досягненні розрядження в камері 4 критичного для утримання заготовки остання відокремлюється від манжети 5 і падає у визначене місце, а тиск в камері 4 підіймається через нижній отвір камери, це через чутник вмикає дію лазера, або перекриває промінь, якщо такий пристрій передбачений в ЛУ), а чутник 11 цим же зростанням відкриває дросель 9 приводом 10 і операція повторюється тому, що місце на штоку вже зайнято черговою заготовкою. В цьому прикладі усі переходи автоматизовані, а за ефект отримання заданого значення діаметру d відповідає постійний його контроль через пропускну здатність площі отвору та можливість його збільшення додатковими імпульсами випромінювання, що дієздатно при достатній товщині заготовки.

Висновки

1. Ефективність та корисність автоматизації технологічної системи базується на широкому використанні особливостей та можливостей її складових (технологічного обладнання, технологічних пристосувань, інструменту) і тактики діяння за умови урахування властивостей об'єкту останнього (пацієнта, заготовки або сировини) з виключенням людського фактору під час роботи системи.

2. Використання інструменту із лазерного променя в різних технологічних системах буде ефективнішим та кориснішим, якщо підчас його створення враховувати більшу частину його особливостей та можливостей, а не тільки найбільш очевидних та привабливих (енергетичних, часових та здатностей до розмірної мініатюризації).

3. До таких невикористаних особливостей лазерного променя відносяться його податливість до оперативних змін його характеристик, що дозволяє енергетичним та розмірним впливом на об'єкт опромінення, що дозволяє під час однієї операції виконувати декілька різних за результатом дій переходів від м'якого нагрівання матеріалу об'єкту, його оплавлення та енергійного його руйнування, що підвищує технологічний ефект.

4. Але найбільший вплив на результат застосування лазерного променя в технологіях надає така його властивість, як прозорість що дає можливість поєднання процесу виконання технологічного завдання з одночасним контролем його протікання з використанням оптичних вимірювальних систем на базі інтерференційних та дифракційних явищ лінійної оптики.

5. Нематеріальність променя, як друга його незвичайна якість, дозволяє в системах автоматизації використовувати пневматичні системи не тільки для додаткової енергетичної насиченості процесу опромінення, але і для використання в системах активного контролю розмірного, якісного та часового результату обробки вимірювачами тиску в струменях газу або його витрат в зоні опромінення.

6. Усі наведені вище якості променя дозволяють розширити застосовність процедури автоматизації технологічних систем, досягаючи при цьому адаптивної форми їх організації.

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що вони не мають жодного конфлікту інтересів щодо цього дослідження, включаючи фінансові, особисті, авторські або будь-якого іншого характеру, які могли б вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

References

- [1] G. S. Tymchik, V. I. Seytsyuk, and T. R. Klochko, *Optik Optical measurements in machining parts*, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2009, 332 p.
- [2] M. F. Tereshchenko, G. S. Tymchik and M. V. Chuhraev, *Ultrasonic physiotherapy apparatus and devices*, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018, 181 p.
- [3] V. P. Kotlyarov, *Technological equipment of laser complexes*, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2013, 592 p.
- [4] V. L. Dubnyuk and V. P. Kotlyarov, "Laser installation for irradiating the surface of the workpiece," UA Patent Unlity Model 106618, pb. 25.04. 2016. b, No. 8.
- [5] V. P. Kotlyarov and Ye. O. Drozdenko, "Method of alloying surface layers of metal products," UA Patent Unlity Model pb. 12.02. 2018, b, No. 3.
- [6] Yu. P. Machehin, O. S. Gnatenko, and Yu. S. Kurskiy, "Laser, opto-electronic devices and systems," in *Laser information measuring equipment for military purposes*, Part 1, Kharkiv: FOP Panov A.M., 2019, 156p.
- [7] V. O. Chadyuk, "Transmission, conversion and reception of optical radiation," in *Optoelectronics from macro to nano*, Book 1, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2018, 376 p.

- [8] P. Kotlyarov, Ye. O. Kondrashkin and V. G. Oliynyk, Laser installation for processing holes in workpieces made of transparent materials. Patent of Ukraine UA130741U, published 26.12.2018.
- [9] Yu. P. Machehin O. S. Gnatenko and Yu. S. Kurskiy, "Laser radiation parameters," in *Laser, opto-electronic devices and systems*, Part 2., Kharkiv: FOP Panov A.M., 2019, 156p.
- [10] V.O. Chadyuk. "Generation of optical radiation," in *Optoelectronics from macro to nano*, Book 2, Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2019, 336 p.
- [11] T. Beck, "Laser drilling in gas turbine blades: Shaping of holes in ceramic and metallic coatings", *Laser Technik Journal*, vol. 8, no. 3, pp. 40-43, 2011, doi: <https://doi.org/10.1002/latj.201190024>.
- [12] V. P. Kotlyarov, M. I. Sergienko and A. M. Tsapok, Installation for processing holes with a laser beam. Patent of Ukraine UA130148U, published 26.11.2018.

Automation of Laser Beam Technological Applications

Viktor Dubnyuk¹ • Valeriy Kotlyarov¹ • Ruslan Zhuk¹ • Olexandr Stepura¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. *The object of the analysis is condition and the level of usage of laser beam as a tool (both quantitative and qualitative) in different technological environments (medicine, material processing, measurements at al.).*

Practical experience in the development and implementation of technological application of laser beam and extensive research of world best practices confirmed that the main factors of its applications are the efficiency of interaction with various materials, wide range of controllable beam power (up to 2.3 MW) and high levels of beam intensity in laser beam processing zone (up to 10^{20} W/cm²) due to its small cross-section ($<10^{-9}$ m) and short interaction time (10^{-15} s). On the other hand, some properties of laser beam were not taken into account as they are rarely used in technological applications.

The goal of this publication data is to increase the quality of technological applications of laser beam as a tool by utilization of the full spectrum of its unique properties.

Among them are the non-materiality of laser beam as a tool, transparency, and ease of control of its key parameters (wavelength, energetic and spatial characteristics). Successful management of these characteristics significantly increases organizational properties of numerous technological applications of laser beam as a tool.

Transparency and non-materiality of electromagnetic energy of laser beam allow to combine the interaction of laser beam with material and simultaneous evaluation (measurement) of laser beam processing results. Such an active control gives data to manage the progress and outcome of processing by controlling laser beam processing parameters, introducing self-adaptivity of technological operations. Unfortunately, there is no information on adaptive development of technological processes that use laser beam as a tool.

Keywords: automation, laser beam, laser beam properties, technological operation, adaptive organization.
