

Систематизація технологічних засад прецизійної лазерної обробки

В. П. Котляров • С. Г. Шкляр • М. І. Сергієнко

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

Received: 09 April 2019 / Accepted: 27 September 2019

Анотація. Метою роботи є побудова складно підлеглої системи технологічних засад (обрання схеми операції, режимне її забезпечення та технологічне оснащення) на базі аналізу реальних технічних завдань на результати обробки з урахуванням типорозміру заготовки та властивостей її матеріалу.

Аналіз реальних можливостей лазерної технології та сучасного технологічного обладнання (з урахуванням його вартості та продуктивності) дав нагоду скласти залежний класифікатор схем обробки, обрати переважні механізми формування оброблювальних елементів, забезпечити їх відповідними режимами обробки та належним технологічним оснащенням. В результаті комплексного використання виконаних розробок створено передумови оптимізації технологічної операції, наприклад, для досягнення заданої якості обробки за умови мінімальних матеріальних та часових витрат. Останнє є результатом не тільки використаних сучасних методик проектування операцій для розроблених і оригінальних схем обробки, а також застосуванням створеного технологічного оснащення при їх практичній реалізації.

Методологічною основою виконаної роботи є використання гнучкості лазерного променя, як заготовки для оброблювального інструменту, з одночасним впливом на властивості оброблювального матеріалу.

Ключові слова: лазерна обробка; операційні ескізи; обробка наскрізних отвори та лунок; оптичні схеми опромінення; оснащення технологічних операцій лазерної обробки; якість операцій; лазерне технологічне обладнання

Вступ

За більш, ніж піввікову історію технологічного застосування лазерного променя, яке почалося з утворення наскрізного отвору в листовій заготовці, суттєво підвищилась якість обробки, що дозволило задовольняти багато критеріальні вимоги технічного завдання (ТЗ) до результатів технологічної операції. Якщо в перших спробах обробки виконувалося лише завдання формування наскрізного каналу отвору, то надалі поступово ускладнювалися вимоги до оброблювального отвору шляхом встановлювання критеріїв на його розміри, їх точність, на показники попереку та повздожньої форми, шорсткості та хвилястості поверхні стінки та крайок. До нормування технологічних показників додалися критерії техніко-економічних, таких, як продуктивність та собівартість операції. Цей плановий процес технологічного прогресу розмірної обробки супроводжується також мініатюризацією оброблювальних елементів із розвитком нано технологій з відповідним та природним підвищенням вимог до якості їх результатів, перетворюючи лазерну розмірну обробку у прецизійну. Вочевидь, такий прогрес лазерної технології є наслідком вдосконалення схем формування оброблювальних елементів, використання комбінованої дії на матеріал заготовки в зоні його опромінення при використанні оптимального за властивостями випромінювання та методів його перетворення в робочий лазерний промінь. Приклади результатів її використання, які наведено у [1], підтверджують високий рівень технологічних показників операцій прецизійної обробки, але, за рідким виключенням, вони надані у вигляді, який не дає можливості їх широкого тиражування. Підставою для такого ствердження є відсутність методик технологічного забезпечення операцій, замість чого гіпотетично описано механізми руйнування та видалення матеріалу із порожнини отвору, що обробляється, та використаного технологічного оснащення. Крім того, використовуються лазери з рідкими властивостями випромінювання, особливо з коротко тривалими імпульсами (порядку піко та фемто секунд), які коштовні, внаслідок чого суттєво, в десятки разів знижується продуктивність обробки, але досягається висока якість, включно точність обробленого елементу, але при можливості використовувати інші засоби досягнення високого рівня якості. В деяких роботах [2, 3] показано, що з використанням мікро секундних імпульсів разом з додатковою операцією електрхімічного оздоблення

поверхні виробів, можливо досягнення подібних результатів обробки стентів при суттєвій знижці собівартості їх виготовлення. Розробці та популяризації подібних альтернативних процесів обробки за умовою дотримання високих вимог до її якості при помірній вартості технологічних операцій присвячена ця робота.

Мета розробок

На базі аналізу та структурування відомих способів, схем та засобів обробки мікро елементів різноманітних розмірів та форми в виробах із різних матеріалів розробити та технологічно забезпечити альтернативні методи їх формоутворення з використанням можливих (доступних і перспективних) елементів лазерної техніки з використанням прогресивних схем опромінення виробів.

Результати розробок

Постановка завдання

Технологія обробки матеріалів лазерним променем (в ужитку лазерна технологія) є складовою частиною технології виготовлення виробів, яка відрізняється видом та властивостями використовуваного інструменту і, як слідство, результатами обробки. На основі цієї сентенції можна стверджувати, що прогрес в розвитку лазерної технології повинен слідувати загальним принципам та підкорятися визначеному алгоритму вдосконалення операцій технології машинобудування. За цим алгоритмом після обрання методу обробки настає черга розробки технологічної схеми операції, що проектується, з деталізацією виду та властивостей обраного інструменту, динамікою його взаємодії з оброблювальною заготовкою, що супроводжується визначенням параметрів взаємодії (режимів обробки). Далі, на базі останнього, обирається або проектується технологічне обладнання, в тому числі технологічне оснащення операції, виходячи з нереалізованих обладнанням елементів та рухів схеми обробки.

Технологічні схеми лазерної прецизійної обробки

Схема обробки, вид, форма та розміри інструменту визначаються типорозміром і вимогами до якості оброблювального елемента, їх кількістю та розташуванням, а також матеріалом, розмірами та формою заготовки.

1. За формою попереку порожнини можна поділити на круглі та фасонні, тобто не круглі. До останніх можна віднести пази (щілини) прямолінійної або криволінійної форми.
2. Повздожня форма порожнин: циліндрична, конічна або фасонна; пази та різи – з нормальними до поверхні заготовки стінками, похилими однаково або по різному з однієї або двох сторін, із криволінійними стінками.
3. Частіше зустрічаються наскрізні порожнини (отвори, різи, щілини), які з'єднують дві сторони заготовки або її внутрішній об'єм із зовнішнім простором, але є потреба в ненаскрізних елементах, наприклад, лунках, пазах та рисках при виготовленні елементів друкарських кліше для глибокого та високого друку, формування регулярного мікро рельєфу на поверхні виробу, тощо.
4. За розмірами попереку порожнини необхідно класифікувати у зв'язку із сучасними часовими режимами опромінення тому, що тепловий механізм руйнування є основним у формуванні порожнини:
 - a – порожнини мікронних розмірів (до 100 мкм), які формуються імпульсами тривалістю від 10^{-9} до 10^{-15} с;
 - b – порожнини розміром до 0,3 мм обробляються імпульсами випромінювання вільної генерації (ВГ) тривалістю від 10^{-5} до 10^{-3} с або пачками імпульсів (пічків) тривалістю 10^{-7} – 10^{-8} с кожний, які утворюються модуляцією добротності резонатору із імпульсів ВГ мілі секундної тривалості;
 - c – при розмірі порожнини більше 0,3 мм її вважають великою та застосовують контурне формування попереку.
5. В залежності від співвідношення глибини лунки або товщини стінки заготовки, в якій виготовляється наскрізний отвір, та розміру його попереку, тобто $h(\delta)/d$, яке іноді називають «аспектним відношенням», порожнини за аналогією з механообробкою прийнято поділяти на дрібні і глибокі. При механічному свердленні глибокими вважаються отвори глибиною $h \geq 10d$, і це пов'язано зі складністю відведення із них остружка. В лазерній обробці поділ враховує дві обставини: по-перше, утруднення постачання енергії випромінювання до дна порожнини при заглибленні останньої в матеріал заготовки. По-друге, внаслідок теплового механізму руйнування матеріалу лазерним променем, який реалізується дією в заготовці теплового джерела, створеного при поглинанні її поверхневим шаром енергії випромінювання, з розмірами, формою та густиною потужності, що визначається теплофізичними властивостями матеріалу і співвідношенням темпів надходження енергії та її відведення із зони опромінення бічним тепловідводом, результат обробки визначатиметься глибиною ненаскрізної порожнини або товщиною стінки заготовки для наскрізного отвору. За дією першої обставини можна вважати глибокою порожнину, якщо її глибина перевищує глибину різкості лінзи (об'єктиву):

$h > 2d_0F/D = 2F^2\theta/D$ ($d_0 = F\theta$ – розмір перетину горловини каустики променя, перетвореного лінзою з фокусною відстанню F , θ – кут розбіжності променя, D – його діаметр). За наведеними залежностями видно, що із збільшенням попереку каустики зростає глибина різкості. Відносно другої обставини: із зменшенням глибини лунки або товщини стінки, в якій створюється порожнина, обмежується відвід тепла із зони опромінення і ним можна нехтувати, якщо вона складає $h(\delta) \ll d/4$ (d – розмір попереку порожнини) при тривалості імпульсу випромінювання $\tau \ll d^2/4a$ (a – температуропровідність матеріалу заготовки). За цих умов опромінення розмір попереку порожнини і його форма повинні дорівнювати формі та розмірам ділянки каустики в межах товщини заготовки завдяки тому, що відсутній потік тепла через її стінки і, відповідно, їх оплавлення, що, зазвичай, збільшує розміри попереку.

1. Для формування *попереку порожнини* використовують одну з трьох схем опромінення заготовки (рис. 1) в залежності від його розміру, форми та вимог до якості.

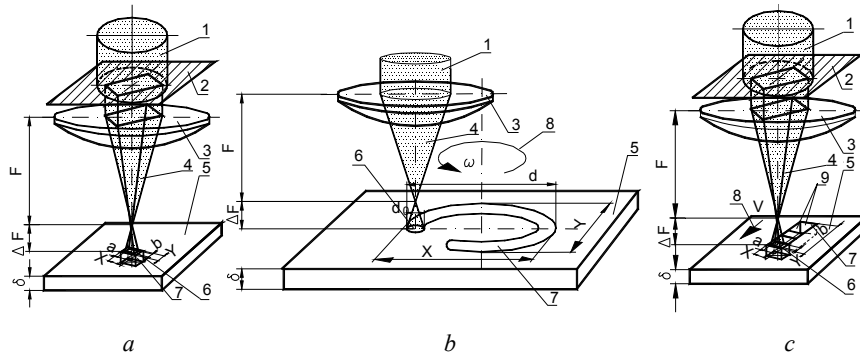


Рис. 1. Технологічні схеми формування попереку порожнин

a – випаровування матеріалу з усього попереку порожнини, *b* – контурне вирізання порожнини, *c* – комбінований метод: вздовж однієї зі сторін порожнини копіювання форми та розміру інструменту, з другої – обходом контуру

(1 – лазерний промінь, 2 – маска (трафарет), 3 – оптична система (лінза), 4 – каустика проміню, перетвореного лінзою, 5 – заготовка, 6 – зона опромінення на поверхні заготовки, 7 – контур порожнини, 8 – контурне переміщення променя

За схемою a (рис. 1) матеріал випаровується з усієї площі зони опромінення 6 з вимогою перевищення рівня інтенсивності випромінювання в ній критичного для матеріалу заготовки рівня. Розміри попереку променя на поверхні заготовки та його форма повинні дорівнювати попереку порожнини, що обробляється в разі обмеженого бічного тепловідводу, в інших випадках необхідно враховувати його збільшення внаслідок оплавлення стінок та вимивання розплаву. Для отворів (лунок) простої форми, найчастіше круглої, з невисокими вимогами до її якості використовується промінь 1 з круглим поперекком, енергія якого концентрується сферичним (параболічним) оптичним елементом (лінза, дзеркало або їх система), при розташуванні поверхні заготовки в перетині горловини його каустики. Обробка може виконуватися одним імпульсом або декількома до досягнення дном порожнини межі різкості оптичної системи тому, що за її межами збільшення розміру попереку променя та зниження від цього рівня його інтенсивності матеріал заготовки на стінці і дні порожнини буде лише частково випаровуватися при формуванні розплаву, тобто форма та розміри її попереку зміняться. При багато імпульсній обробці наслідки цього явища можна компенсувати шляхом зміння енергетичних умов опромінення або відслідкуванням перетином горловини каустики міграції дна порожнини вглиб заготовки зміщенням каустики або її подовженням (змінюючи фокусну відстані оптичної системи, наприклад, використанням трансфокаторів [4]).

Деякого подовження глибини різкості оптичної системи з позитивною сферичною аберрацією положення фокусу можна досягти *вливом на частоту лазерного випромінювання* ν шляхом перенастроювання резонансних властивостей резонатора лазера з дисперсійним елементом, використовуючи по черзі його подовжні моди із спектру люмінесценції активного середовища $\Delta\lambda$ [5]. Така схема обробки може використовуватися для формування отворів обмеженої глибини тому, що за умови використання лінзи з фокусною відстанню 100 мм її приріст досягне 1,5 мм за 30 пічків (коротких імпульсів) з кроком 0,05 мм при кожному скороченні довжини хвилі на 0,5 нм (для лазера YAG: Nd³⁺ $\Delta\lambda = 1080 \div 1065$ нм). Принципові обмеження на подовження глибини різкості оптичної системи в цьому випадку внаслідок кінцевої ширини спектру люмінесценції активного середовища можуть бути здолані його розширенням шляхом розмиття лазерних рівнів квантової системи домішки (Nd³⁺) в активному середовищі, збільшуючи його концентрацію для дії ефектів Зеемана та Штарка. Але керування процесом утворення порожнини лише «втягуванням» каустики променя при підтриманні незмінного, хоча і високого, рівня інтенсивності на її дні недостатньо тому, що доставці енергії випромінювання заважає вхідна ділянка порожнини, яка руйнується черговими пічками тому, що їх інтенсивність суттєво вище рівня, потрібного для випаровування матеріалу, а та частина імпульсної енергії, яка досягає цілі, зазнає багатократне відбиття від стінки каналу порожнини, оплавляючи її та збільшуючи розмір попереку при зменшенні товщини випару зі дна. Тому за наближенням порожнини до

протилежної стінки заготовки вона додає загальну зворотну конусоподібність до вхідного конусу. До цих недоліків розробленої схеми обробки додається складність лазерної техніки, яка необхідна для її реалізації та низький коефіцієнт корисної дії (ККД) останньої.

Завдання утримання незмінного рівня інтенсивності на дні порожнини, що формується, при її заглибленні можна вирішити поступовим підвищенням імпульсної енергії або (та) скороченням тривалості імпульсів (пічків) за умови зберігання достатньої якості променя (з коефіцієнтом його розповсюдження $M^2 < 1,5$) [6]. Для обробки наскрізних отворів $\varnothing 15 \div 150$ мкм циліндричної форми та глибоких лунок при відношенні $h(\delta)/d = 40 \div 150$ використовуються пічки тривалістю $20 \div 60$ нс з імпульсною енергією $E_i \in 350 \div 90$ мДж, що дозволяє досягати пічкової інтенсивності в зоні опромінення $I_{ps} \geq 10^9$ Вт/см². Такий режим генерації реалізовувався на лазерній технологічній установці (ЛТУ) з одномодовим лазером на YAG: Nd³⁺. Тривалість імпульсу накачування активного елемента складала $\tau_n = 200$ мкс, частота їх надходження варіювалася в діапазоні $f = 1 \div 30$ Гц. З цих мікро секундних імпульсів цуг пічків нано секундної тривалості формувався модульованим добротності резонатору пасивним лазерним затвором (ПЛЗ) з кристалом LiF: F₂⁻ із змінним початковим попусканням від 20 до 70%. Для досягнення найбільших співвідношень $h(\delta)/d = 155$ для $d = 130$ мкм в швидкоріжучій сталі та 150 для $d = 20$ мкм в твердому сплаві T15K6 використовувалися лінзи з фокусною відстанню $F = 100$ та 50 мм відповідно, глибина різкості яких $l = 2d_0F/D$ дорівнювала відповідно 8,7 та 6,5 мм, час обробки одного отвору складав 50 та 60 с. Практичній реалізації технологічної операції в подібній постановці заважають складності, викликані високим рівнем пічкової інтенсивності $I_{ps} \geq 10^9$ Вт/см²: цього потребує механізм випаровування матеріалу зі дна лунки протягом усього часу її формування. За таких умов опромінення створюється можливість формування ерозійного плазмового факела, який стає непрозорим при високому ступені його іонізації черговими пічками в горловині каустики, тобто у гирлі лунки, а за межами глибини різкості l лінзи (для сталі P18 при обробці лунки $d = 130$ мкм лінзою з $F = 100$ мм $l \sim 9$ мм) швидкість заглиблення дна лунки знову суттєво підвищилась до її заглиблення на 20 мм. Таким чином, для збереження стабільно високого рівня швидкості заглиблення необхідно поступово змінювати енергетично – часові параметри обробляючих пічків, в тому числі частоту їх надходження f . Переналадження параметрів резонатору та умов накачування активного середовища неможливо протягом тривалості між імпульсною перерви ($t = T - \tau$, де: $T = 1/f$ – період надходження імпульсів). До того ж, змінення параметрів променя не повинно торкатися його просторових характеристик: діаметра D та кута направленості тому, що це може викликати викривлення поперек та профілю оброблювального елемента. Рекомендована авторами розробки методика змінення початкового пропускання ПЗ, встановленого в лазері, шляхом крокового або плавного переміщення кристалу зі змінною вздовж його осі концентрацією домішки Li₂⁻ поперек осі резонатору, не піддається критиці, як за технологією його вирощування, так і за шляхом змінення параметрів резонатору.

Більш простим у реалізації є газо лазерний режим формування глибоких порожнин (отворів та лунок). Його ідея побудована на використанні протягом обробки штучного вимивання розплаву зі дна оброблювальної порожнини [7], коли її глибина перевищує глибину різкості лінзи. Якщо для початку формування порожнини в зоні її опромінення створити теплове джерело з густиною потужності, що перевищує рівень, достатній для випаровування матеріалу заготовки, то після досягнення дном порожнини межі різкості лінзи процес випаровування матеріалу з його поверхні поступово затухатиме, переходячи в етап сумісного руйнування «випаровування-плавлення» з мало інтенсивним пароутворенням. Це супроводжується частковим самовидаленням матеріалу та переміщенням його розплаву частково з паром до гирла порожнини з поступовим охолодженням та викривленням її поперек та повздовжнього профілю, створеними на етапі інтенсивного випаровування. При подальшому надходженні імпульсної енергії в порожнину (в багато імпульсному режимі) та досягненні нею дна за рахунок багатократного відбиття від стінки (каналізація променя) матеріал по черзі плавиться та твердне, що не збільшує глибини порожнини. Якщо під час опромінення співвісно з лазерним променем подавати стислий газ (повітря) під тиском, достатнім для видалення розплаву з дна порожнини, то процес її формоутворення подовжується до глибини, поки інтенсивність на поверхні дна не знизиться до рівня, за яким оплавлення буде неможливим. Є декілька особливостей схеми обробки (рис. 2):

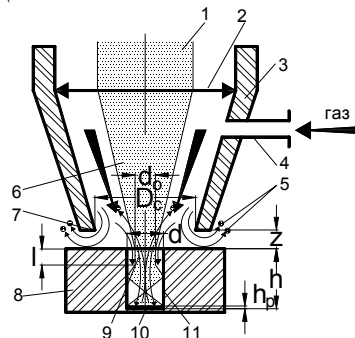


Рис. 2. Схема операції газо лазерної обробки отвору (лунки) та її оснащення

(1 – лазерний промінь, 2 – лінза, 3 – різак, 4 – штуцер для подачі стислого газу, 5 – бризки розплаву, 6 – каустика променя в лінзі 2, 7 – сопло для подачі газу в зону опромінення, 8 – заготовка, 9 – дільниця глибини різкості лінзи, 10 – дно лунки, 11 – дно заготовки)

- режими опромінення обираються за методикою, що забезпечує обробку дрібного отвору випаровуванням матеріалу в межах його попереку (рис. 1а);
- діаметр каустики променя 6 (рис. 2) на поверхні заготовки 8 d_0 дорівнює діаметру отвору 9 d , для чого обирається лінза 2 з фокусною відстанню $F = d/\theta$, у випадку $\theta \neq \theta_{np}$ перед лінзою 2 використовують телескоп Галілея із збільшенням $\Gamma \approx \theta_{np}/\theta$, який налагоджують із зміщенням Δ однієї з його лінз у відповідному напрямку для досягнення потрібного значення кута розбіжності θ :

$$\Delta_{1,2} = 0,5\left(\frac{D}{2\theta_{np}} + x\right) \pm \left[\frac{1}{4}\left(\frac{D}{2\theta_{np}} + x\right)^2 + \left(\frac{F_1^2\theta}{\Gamma\theta_{np}} - F_1^2\right)\right]^{1/2},$$

де: D – діаметр променя 1, θ_{np} – його кут розбіжності, x – відстань від лазера до переднього (умовного) фокусу F_1 від’ємної лінзи, яка є першою на шляху променя 1;

- якщо глибина різкості лінзи $l = 2F^2\theta/D$ менше, ніж задана глибина лунки або товщина стінки, в якій обробляється отвір, то операція повинна супроводжуватися подачею стислого газу (повітря) тиском до 20 МПа через сопло 7 різачу 3 співвісно із променем 1;
- діаметр сопла 7 D_c повинен бути більшим ніж діаметр отвору, що обробляється в 7 – 8 раз, його розташування над поверхнею заготовки 8 $z \leq d^0/D_c$: так, для обробки отвору $\varnothing 50$ мкм в заготовці з нержавіючої сталі завтовшки 4 мм (рис. 3) використано промінь розміром $d_0 = 45$ мкм (на поверхні заготовки) та сопло $\varnothing 300$ мкм.

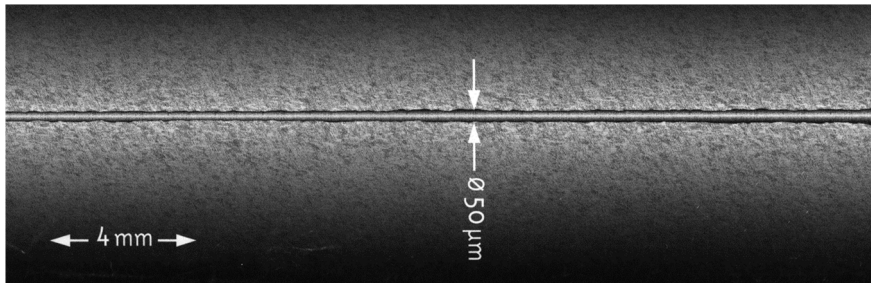


Рис. 3. Отвір в нержавіючої сталі завтовшки 4 мм

Для формування *дрібних порожнин з фасонним попереком або з підвищеними вимогами до якості простого контуру* (нормована некруглість) за варіантом рис. 1а необхідно використовувати профілювання попереку зони опромінення проекційним перетворенням лазерного променя [8], пропускаючи останній через маску з профільним отвором, розташовану перед лінзою (об’єктивом). Наданий променю профіль з достатньою чіткістю контуру зберігається лише в за фокальній її площині (площина проєкцій), яка оптично пов’язана з площиною розташування маски (площина предметів), тому проекційний спосіб обробки може використовуватися лише для формування неглибоких порожнин або отворів в заготовках із фольги або плівки.

Більші та глибші порожнини складного попереку можуть формуватися шляхом контурного взаємного переміщення заготовки та (або) променя за схемою b (рис. 1), причому розміри та поперек останнього на поверхні заготовки мають бути ефективними для реалізації енергетичного режиму опромінення в обраному механізмі руйнування матеріалу заготовки та його видалення із оброблювальної порожнини. Вид відносного переміщення променя та заготовки залежить від розмірів попереку порожнини та габаритів заготовки. Прецизійні порожнини з попереком до 300 мкм контурно вирізаються при взаємно нерухомих заготовці та оптичній системі сканування променя вздовж контуру, причому в газо лазерному режимі формування порожнини ця можливість забезпечується розміром отвору в газовому соплі D_c (рис. 2). Для формування більших за попереком порожнин також використовують схему опромінення із лінзою з плоским полем, тобто з розташуванням двох координатного гальванометричного сканера над лінзою. При використанні сферичної лінзи з фокусною відстанню $F = 100$ мм поле обробки (максимальний розмір перетину порожнини, що може формуватися без викривлення її попереку) досягає 100×100 мм, з лінзою особливої конструкції або з додатковим ступінчастим елементом, що відхиляє (free-form phase shifting element [1]), поле обробки може бути збільшено до 150×150 мм. Вирізання порожнин великого розміру ($d_{пор}$ до 10 мм) круглої форми (отворів) може виконуватися шляхом їх трепанації нерухомих променем кільцевої форми. Однак, це потребує імпульсного лазера з середньою потужністю, що перевищує необхідну для контурного вирізання у $4d_{пор}/d$ рази, тобто в 80 – 800 (для $d_{пор} = 10$ мм та $d = 0,05$ мм) та спеціальних оптичних елементів (аксиконів) для реалізації такої схеми опромінення [8]. Наскрізнi порожнини великих розмірів призвільного попереку формуються при координатному обході їх меж двох координатним рухом малогабаритної заготовки відносно нерухомого променя (оптичної системи), або рухом променя вздовж контуру порожнини в габаритній заготовці. В останньому варіанті полегшення навантаження на координатний привод внаслідок меншої маси оптичного

вузла супроводжується необхідністю корекції параметрів інструменту – перетвореного ним лазерного променя – при змінній відстані між лазером та зоною опромінення.

Якщо порівнювати особливості обробки за схемами *a* та *b* (рис. 1), то очевидним є більша продуктивність першої схеми при підвищених вимогах до інструменту внаслідок необхідності його пристосування до розмірних та якісних вимог ТЗ, та гнучкість іншої, тому що одним за суттю інструментом – гостро сфокусованим лазерним променем – можна виконувати обробку різних за змістом завдань. Але схема *b* має головний недолік – операції за її виконанням тривалі. Скоротити вплив цього недоліку можна обробкою за схемою *c* (рис. 1), яка поєднує переваги перших двох внаслідок того, що контурна обробка, яка надає гнучкості технологічній операції, виконується інструментом із профільованим попереком хоча б в напрямку однієї з координат. Тоді, при необхідності формування порожнини, виїмки, наприклад, з прямолінійним контуром скоротиться час її виготовлення внаслідок зменшення значення коефіцієнту перекриття сусідніх елементарних лунок, необхідного для формування прямокутних пазів, канавок вздовж контурного переміщення інструменту та заготовки.

2. Керування *повздожнім профілем* порожнин, які формуються за схемою копіювання каустики лазерного променя, перетвореного оптичною системою (рис. 1а), можливо впливом на просторові і енергетичні її параметри та умови опромінення – взаємне положення каустики та заготовки та алгоритм їх відносного позиціонування вздовж осі променя під час обробки. Використовуючи при формуванні порожнини випаровування матеріалу заготовки із зони опромінення, його розплавлення на дні та стінці з цілеспрямованим переміщенням та отвердінням, можна виконати створення повздожнього профілю порожнини будь якої складності. Пошук технологічного регламенту формування профілю порожнини базується на математичному моделюванні процесу обробки відносно узагальненого показника профілю в умовах багатофакторного експерименту. Деталі такого моделювання викладено у [9] і методика не потребує повторення в даній роботі.

При використанні контурного формування порожнини для надання їй повздожньому профілю заданої форми використовують можливість гнучкого перетворення лазерного променя в інструмент, включаючи його просторове положення відносно заготовки, переміщення та його планові змінення. При перетворенні лазерного променя в інструмент застосовується декілька схем формування його каустики (рис. 4). Схема на рис. 4а

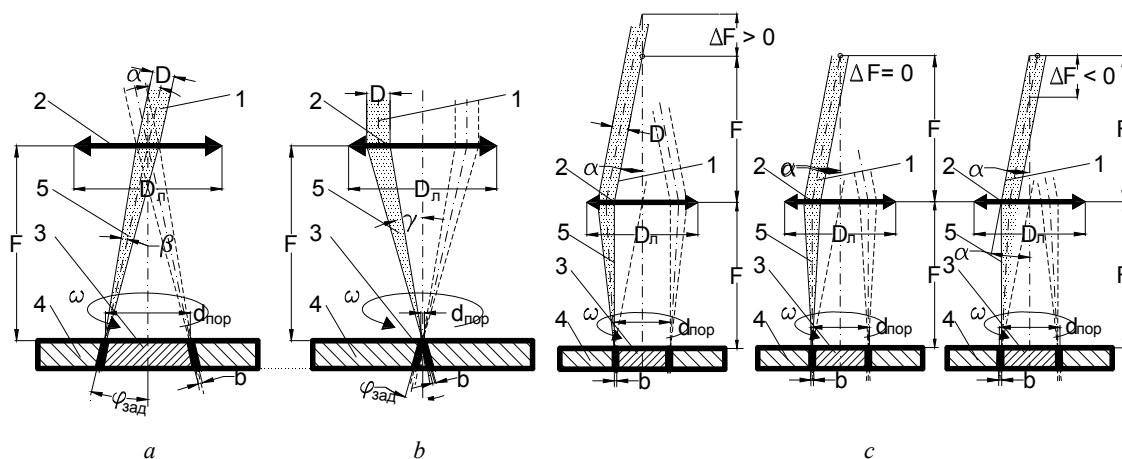


Рис. 4. Схеми опромінення в операціях обробки отворів методом трепанції

a – центральним променем, *b* – ексцентричним променем, *c* – варіанти опромінення для вирізання циліндричних отворів (1 – лазерний промінь, 2 – лінза, 3 – відхід, 4 – заготовка, 5 – каустика променя)

дозволяє вирізати порожнини (отвори) з заданим кутом нахилу стінки $\varphi_{зад}$ шляхом змінення кута падіння центрального променя 1 на лінзу 2 $\alpha = \varphi_{зад} - \arctg\{D/[2(F^2 + d_{ноп}^2)^{0.5}]\}$. Порожнини з нахилом стінок, а також отвори з прямим та зворотнім конусом під кутом φ можна обробити каустикою променя, ексцентричного до осі лінзи (рис. 4b). Для оперативного керування нахилом стінки порожнини (отвору) потрібна можливість плавного змінення ексцентриситету e і для нахилу на заданий кут $\varphi_{зад}$ промінь необхідно змістити з осі лінзи на величину $e = F \tan \varphi_{зад} - D/2$. Циліндричні отвори або порожнини з нормально похилими стінками обробляються променем, який, проходячи через передній фокус лінзи 2 створює каустику, що має вісь або одну із її сторін, перпендикулярну до поверхні заготовки (рис. 4c). Для вирізання отвору діаметром $d_{ноп}$ в заготівці з товщиною, меншою ніж глибина різкості лінзи 2 (ліва схема на рис. 4c), кут нахилу променя 1 повинен бути рівним $\alpha = \arctg(d_{ноп}/2F)$, а його вісь повинна пересікати вісь лінзи в точці, яка вище фокальної площини лінзи на величину $\Delta F = D/(2 \sin \alpha)$. Глибокі отвори вирізаються шляхом поступового збільшення фокусної відстані лінзи 2 та відповідно кута нахилу променя $\alpha = d_{ноп}/2F$ (центральна схема рис. 4c). За відсутності трансфокатора та пристрою для плавного змінення кута α можна використовувати праву схему рис. 4c, за якою похилий на кут α промінь, вісь якого пересікає вісь лінзи нижче її фокальної площини на відстань $\Delta F = -(D/2F)$, необхідно

занурювати вглиб заготовки на крок S_z , який дорівнює прирощенню глибини отвору за один оберт променя при його обертанні навколо осі лінзи з кутовою швидкістю ω .

Ненаскрізнi порожнини складного профiлу обробляються шляхом їх фрезерування за растровим скануванням променя (заготовки) (рис. 5). Задана глибина порожнини H (в межах глибини різкості оптичної системи) досягається багато імпульсним режимом опромінення серією імпульсів тривалістю τ_s з багато пічковою структурою при їх скороченій тривалості τ_i , та збільшеній частоті надходження $f_i = fH/\Delta$ (H – глибина порожнини, Δ – її приріст від дії одного пічка).

При глибині порожнини більшій, ніж глибина різкості оптичної системи (лінзи, об'єктиву), для дотримання вимог до її якості необхідно подовжувати оптимальний рівень інтенсивності на дні оброблювальної порожнини до завершення операції. При використанні ЛТУ із зоною обробки, забезпеченою приводами в системі 3D, це завдання вирішується впливом на взаємне положення каустики та заготовки, в інших випадках підтримання початкових умов опромінення повинне гарантуватися технологічним оснащенням операції, а також використанням спеціальних схем обробки. Шляхи збільшення глибини отвору, який формується випаровуванням матеріалу заготовки в межах його попереку, наведені вище.

Режимне забезпечення технологічних операцій лазерної обробки прецизійних елементів

Аналізуючи відомі методики аналітичних та експериментальних методів проектування технологічних операцій (обрання режимів та умов опромінення) можна зробити декілька висновків, що торкаються їх складності, коректності та тривалості.

1. Відомі методи аналітичного проектування побудовані на використанні спрощених рішень рівняння теплопровідності про опроміненні заготовок з металів [9] імпульсами ВГ безпiчкової структури та з впорядкованою послiдовністю пічків в якості моделей процесу. Механізм утворення порожнин (отворів) – руйнування (сублімація) матеріалу зі дна порожнини прямим діянням лазерного променя, тому коректність розрахункових результатів гарантується за умови забезпечення в зоні опромінення потрібного рівня інтенсивності, наявності достатньо тривалих пауз в надходженні порцій енергії при багато імпульсному режимі опромінення для видалення випарів з каналу порожнини. Останні з попереком, меншим ніж 0,3 мм, формуються імпульсами мікро секундної тривалості за схемою рис. 1а, але для обробки порожнин мікронних розмірів або за підвищеними вимогами до їх якості використовують імпульси нано, піко та фемто секундної тривалості з імпульсною енергією в декілька мікро або мілі джоулей.

Також для інших механізмів формування порожнин (отворів або лунок), наприклад, з газу лазерною обробкою (рис. 3) або з наскрізним проплавленням стінки заготовки з частковим випаровуванням її матеріалу та подальшим переформатуванням та затвердінням розплаву під дією сил поверхневого натягнення за умови збереження моноліту із заготовкою по периферії отвору (рис. 5), можливе використання при проектуванні операцій аналітичних моделей, створених на базі різних концепцій цих механізмів (балансу енергії при нагріванні матеріалу, тощо).

Недоліком аналітичних моделей є те, що вони розроблені лише для розмірних показників технологічної операції (діаметр (ширина) та глибина обробленого елемента) і неможливі для опису показників більш високого порядку, наприклад, їх якості, внаслідок складності останніх та невизначеності кількісних зв'язків їх утворення. Тому чисто аналітичне проектування застосовується лише для одно критеріальних задач, для інших випадків необхідно додаткове експериментальне (емпіричне або математичне) моделювання.

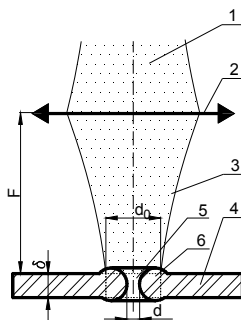


Рис. 5. Схема утворення мікро отвору силами поверхневого натягнення

(1 – лазерний промінь, 2 – лінза, 3 – каустика променя, перетвореного лінзою, 4 – заготовка, 5 – отвір, 6 – тор)

2. В основу проектування режимів контурного вирізання наскрізних порожнин (отворів) або фрезерування виїмок покладена схема їх утворення шляхом суперпозиції окремих отворів або лунок вздовж контуру порожнини (рис. 1b, c) або в межах її площі, якщо ширина останньої суттєво перевершує діаметр або ширину променя на поверхні заготовки (рис. 6). У разі використання випару матеріалу та його само видалення в якості механізму формоутворення одиничних отворів або лунок, то алгоритм проектування операцій обробки

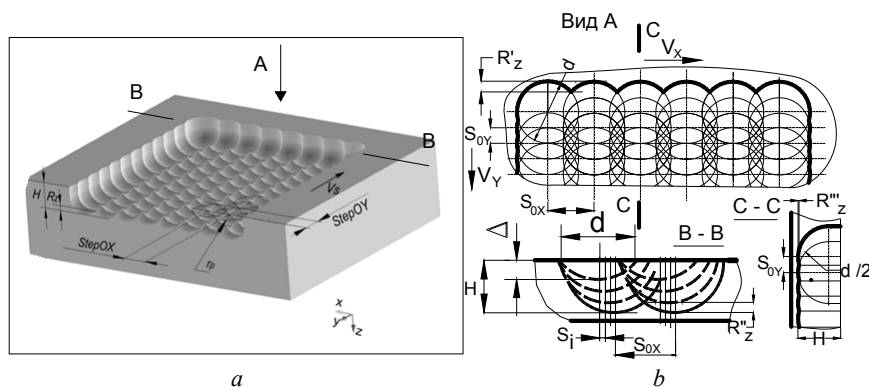


Рис. 6. Схема утворення ненаскрізної порожнини із складним контуром шляхом растрового сканування за двома координатами
(*a* – зовнішній вигляд порожнини, *b* – схеми переміщення променя (заготовки))

одиночних елементів, розглянутий вище, при його доповненні визначенням умов їх взаємного розташування для того, що б узагальнені якісні показники обробленої порожнини (точність її розмірних показників, похибки повздовжньої форми і попереку, шорсткість поверхонь стінок та дна R_z' , R_x'' та R_z''') відповідали встановленим в ТЗ, може використовуватися для проектування операцій контурного формування порожнин.

3. Експериментальні методи проектування порожнин для будь-якої схеми їх обробки (рис. 1) можуть використовуватися для проектування операцій з оцінкою їх результатів за одним або багатьма показниками. Головними перевагами цих методів є можливість врахування при проектуванні усіх вимог ТЗ до результатів обробки, використання отриманих моделей для автоматизованого керування процесом в технологічних системах, що обробляють (ТОС), в том числі при адаптивній формі організації операції. До недоліків можна віднести складність реалізації методики проектування при суттєвій її тривалості, до того ж математичні моделі, які складають основу проектування, недовготривалі та схильні до випадкових або планових руйнувань, тобто потребують періодичної корекції.

4. Комбіновані методи проектування, при реалізації яких повноцінно використовуються методи багато факторної оптимізації при використанні доступних аналітичних моделей процесу та експериментальних, створених для тих показників, які не моделюються аналітично. Ці методи однаково характеризуються недоліками та перевагами кожного із окремих методів.

5. Спрощені методи проектування операцій з багатокритеріальною оцінкою їх результатів [10]. Ці методи також можна віднести до комбінованих, але наряду з використанням досяжних аналітичних моделей, об'єднуючи які, виконують пошук режимів обробки за моделями розмірних результатів, продуктивності та собівартості операцій, витримання вимог до якісних, наприклад, показників досягається застосуванням додаткових методів або засобів вдосконалення операцій, тобто не режимними шляхами.

В таблиці 1 зведено основні алгоритми проектування, що практично реалізуються і які прив'язані до можливих схем формоутворення порожнин шляхом випаровування матеріалу заготовки із порожнини, його плавлення та видалення дією додаткового інструменту – газового струменя (рис. 2 та 3) або створюючи для розплавленого матеріалу можливість його переформатування згідно з законами фізики, наприклад, під дією сил поверхневого натягнення та сил тяжіння (рис. 5). Для полегшення застосування наведених алгоритмів необхідно навести деякі пояснення.

- для формування елементарних отворів (лунок) за схемою рис. 1а використовуються імпульси випромінювання з регулярною часовою структурою, складові якої (пічки або мікро імпульси) можуть бути тривалістю із мікро секундного, нано секундного, піко секундного або фемто секундного діапазонів в залежності від якісних вимог до результатів операції;
- при контурному формуванні попереку наскрізної порожнини використовують суперпозицію елементарних отворів вздовж її крайок (рис. 1b) або вздовж довжини (рис. 1c), а попереку ненаскрізних порожнин (рис. 6) формується його заповненням елементарними лунками за обраною схемою розташування останніх
- за обраним в п. 3.6. табл. 1 рівнем частоти надходження імпульсів $f_{\text{дiac}}$ обирається швидкість відносного контурного переміщення променя і заготовки V , причому її величина обмежується допусками на розміри порожнини ($It(d(b))$, $It(h)$) або допустимою шорсткістю її стінок та дна R_z :

$$V_{\text{вир } 0X(0Y)} \leq f_{\text{дiac}} d [1 - (1 - It(d)/2d)^2]^{1/2} - \text{для стінок}$$

$$V_{\text{вир}} \leq f_{\text{дiac}} d [1 - (1 - It(h)/d)^2]^{1/2} - \text{для її дна}$$

$$V_{\text{вир}} \leq f_{\text{дiac}} d [1 - (1 - 2R_z/d)^2]^{1/2} - \text{для обмеженої шорсткості поверхонь стінок та дна;}$$

- для обробки отворів діаметром, меншим, ніж мінімально можливий розмір зони опромінення при концентрації енергії променя з довжиною хвилі $\lambda > d$ та з дифракційним рівнем його кута розбіжності оптичним елементом з фокусною відстанню (робочим відрізком) $\sim 1 \div 3$ мм використано особливий режим їх формування із залученням сил поверхневого натягнення, які діють на матеріал в зоні опромінення при наскрізному розплавленні стінки заготовки (колонка 5 табл. 1). В якості останньої використовують фольгу або плівку завтовшки $\delta > d$, яку в зоні обробки багаторазово опромінують в режимі “плавлення – випар” з частковим видаленням матеріалу ($10^5 < W_p < 10^6$ Вт/см²). Обробка виконується декількома імпульсами N і після кожного імпульсу в зоні локалізації енергії променя матеріал дають можливість повторно твердіти при збільшеному періоді надходження імпульсів t_s . зменшуючи свою товщину, причому ця діє подовжується, поки його об’єму в межах зони опромінення залишається достатньо для заповнення зони. Поступове зменшення об’єму матеріалу приводить до формування з його залишку тіла з мінімальною поверхневою площею в межах зони опромінення, тобто тора з внутрішнім розміром d , меншим ніж діаметр зони опромінення d_0 (рис. 5). Мінімальний розмір отвору було оброблено за цією схемою в таких умовах: заготовка з платини (Pt) завтовшки 10 мкм ($A = 0,785$), енергія імпульсу випромінювання 50 мкДж з довжиною хвилі $\lambda = 1,06$ мкм концентрувалася мікро об’єктивом з фокусною відстанню $F = 3$ мм в зону $d_0 = F\theta = = 3 \times 0,001 \approx 0,003$ мм, де створювалася інтенсивність $\sim 9 \cdot 10^5$ Вт/см². В результаті діяння 10 – 12 імпульсів, кожний з яких мав тривалість 600 мкс формувався отвір діаметром 0,0003 мм .
- для реалізації схем опромінення (рис. 4), а також в разі необхідності підвищення якісних результатів обробки, вимоги до яких не враховуються при проектуванні режимів за наведеними методиками, можливі нережимні шляхи вдосконалення операцій, деякі з яких приведено нижче.

Таблиця 1

Алгоритми проектування операцій лазерної обробки порожнин

№ дій	Назва дії	Види технологічних операцій			Прим.
		3	4	5	
1	Аналіз вхідних даних	<ul style="list-style-type: none"> - розміри порожнини, що обробляється (d (b); h) - якісні вимоги до порожнини ($It(d$ (b)); $It(h)$; R_z) - форма попереку порожнини (кругла, фасонна) - подовжній профіль порожнини (циліндрична, конічна, фасонна) - матеріал заготовки (W_p^{eun}, W_p^{nl}, T_{eun}; T_{nl}; L_{eun}; L_{nl}; ρ; k; a) - розміри заготовки (δ), форма та розташування поверхні з обробленим елементом 			
2	Технологічна схема операції	рис. 1a рис. 1c (одна з координат)	рис. 1b рис. 1c (одна з координат)	рис. 5	
3	Проектування режимів обробки				
3.1	Інтенсивність в промені $Ip_{спозр}$	$Ip_{спозр} = W_p/A$ ($W_p \geq 10^7$ Вт/см ²)	$Ip_{спозр} = W_p/A$ ($W_p \geq 10^7$ Вт/см ²)	$Ip_s = W_p/A$ ($W_p < 10^6$ Вт/см ²)	
3.2	Тривалість пічка (імпульсу) τ_{sdiuc}	$\tau_{спозр} = 4 \times 10^{-3} d^2/a$ $\tau_{sdiuc} \approx \tau_{спозр}$	$\tau_{спозр} = 4 \times 10^{-3} d^2/a$ ($d=b$) $\tau_{sdiuc} \approx \tau_{спозр}$	$\tau_p = L_{nl}\rho h/W_{ps}$ $\tau_{diuc} \approx \tau_p$	
3.3	Дійсна інтенсивність в промені Ip_{sdiuc}	$Ip_{sdiuc} = hL_{eun}/A\tau_{sdiuc}$	$Ip_{sdiuc} = hL_{eun}/A\tau_{sdiuc}$	$Ip_{diuc} = L_{eun}\rho[\delta - 0,35(\alpha\tau_{diuc})^{0,5}]/A\tau_{diuc}$	
3.4	Шар матеріалу Δ_i , видалений одним пічком	$\Delta_i = Ip_{sdiuc}\tau_{sdiuc}/(AL_{eun}\rho)$	$\Delta_i = Ip_{sdiuc}\tau_{sdiuc}/(AL_{eun}\rho)$	-	
3.5	Період надходження пічків t_s	$h/V_p + \tau_{sdiuc} < t_s < 0,05d^2/a + \tau_{sdiuc}$	$t_s < 0,05d^2/a + \tau_{sdiuc}$	-	
3.6	Частота надходження пічків f_{diuc}	$f_{спозр} = 1/t_s$ $f_{diuc} \geq f_{спозр}$	$f_{спозр} > (0,05d^2/a + \tau_{sdiuc})^{-1}$ $f_{diuc} \geq f_{спозр}$	-	
3.7	Кількість пічків для глибини h	$N = h(\delta)/\Delta_i$	-	-	
3.8	Енергія одного пічка E_i	$E_i = AIp_{sdiuc}\tau_{sdiuc}\pi d^2/4$	$E_s = AIp_{sdiuc}\tau_{sdiuc}\pi b^2/4$	$E_s = AIp_s\tau_{diuc}\pi d_0^2/4$	
3.9	Імпульсна енергія E	$E = N \times E_i$	$E = N \times E_s$	$E = N \times E_s$	

3.10	Фокусна відстань лінзи з глибиною різкості $l \geq h(\delta)$	$F_{розр} \geq D(\pi\delta/11,12\lambda)^{0,5}$ $F_{діюс} \geq F_{розр}$	$F_{розр} \geq D(\pi\delta/11,12\lambda)^{0,5}$ $F_{діюс} \geq F_{розр}$	$F_{розр} = d_0/\theta$ $F_{діюс} \leq F_{розр}$	
3.11	Діаметр променя на поверхні заготовки d_0	$d_0 = d$	$d_0 = d(b)$	з рівняння $d = d_0 \{ \ln[2AE / (\pi\tau_{діюс} \times W_p^{nn} d_0^2)] / 2 \}^{0,5}$	
3.12	Кут розбіжності променя на лінзі θ_l	$\theta_l = d_0/F_{діюс}$	$\theta_l = d_0/F_{діюс}$	$\theta_l = d_0/F_{діюс}$	
3.13	Параметри телескопу (збільшення Γ та ступінь його розладу Δ для узгодження кутів θ_e та θ_l)	$\Gamma = \theta_e / \theta_l$ $\Delta_{1,2} = 0,5 \left(\frac{D}{2\theta_e} + x \right) \pm \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{2\theta_e} + x \right)^2 + \left(\frac{F_1^2 \Gamma \theta_l}{\theta_e} - F_1^2 \right) \right]^{1/2}$	$\Gamma = \theta_e / \theta_l$ $\Delta_{1,2} = 0,5 \left(\frac{D}{2\theta_e} + x \right) \pm \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{2\theta_e} + x \right)^2 + \left(\frac{F_1^2 \Gamma \theta_l}{\theta_e} - F_1^2 \right) \right]^{1/2}$	$\Gamma = \theta_e / \theta_l$ $\Delta_{1,2} = 0,5 \left(\frac{D}{2\theta_e} + x \right) \pm \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D}{2\theta_e} + x \right)^2 + \left(\frac{F_1^2 \Gamma \theta_l}{\theta_e} - F_1^2 \right) \right]^{1/2}$	
3.14	Швидкість відносного переміщення променя та заготовки	-	$V_{вуп} \leq \frac{d}{\delta} \frac{Wp_{діюс} \tau_{діюс} f_{діюс}}{\rho L_{сун}}$	-	
3.15	Обмеження на швидкість $V_{вуп}$	-	$V_{вуп} \leq f_{діюс} d [1 - (1 - R_z/2d)^2]^{1/2}$	-	
3.16	Частота при БІО ($N = h(\delta)/\Delta$)	-	$f_{діюсБІО} \leq \Delta f_{діюс} / \delta$	-	

Способи та засоби додаткового вдосконалення операцій прецизійної лазерної обробки

1. Засоби формування інструменту з лазерного променя для обробки порожнин методом трепанції.

При проектуванні наскрізних порожнин круглої форми (отворів), розмір попереку яких d_{nop} перевищує діаметр перетину горловини каустики перетвореного оптичним елементом променя d_0 , а їх повздовжній профіль повинен бути циліндричним або мати задану конусоподібність, застосовується метод їх вирізання променем з каустикою відповідної форми з керованим нахилом її осі (рис. 4). Для обробки порожнин циліндричної форми можуть застосовуватися сканери простої схеми та конструкції, в яких заданий розмір порожнини надається ексцентричним розташуванням оптичного елемента на шляху променя [11], а на її профіль впливає діаметр променя на рівні головної площини елемента та фокусна відстань останнього. З використанням пристроїв такої схеми важко зраховувати та виконувати вимоги до розмірів і форми порожнин та використовувати більшість технологічних схем відповідно до рис. 4. До того ж бажано мати пристрій такої конструкції та елементної бази, який би дозволяв оперативно та керовано змінювати умови опромінення, обираючи в кожному випадку найбільш ефективну та продуктивну технологічну схему. На рис. 7 зображено оптичні схеми такого сканера у випадках його застосування для основних видів операцій вирізання отворів. В його конструкції використано оптичні клини для керування напрямом розповсюдження променя та надання каустиці останнього потрібних рухів сканування в додаток до робочих переміщень подачі.

Сканер за схемою рис. 7а складається з чотирьох клинів, які формують вузли 6' - 6'' та 7' - 7'', що розташовані на шляху променя 1 один над іншим перед лінзою 2. Перший вузол призначено для паралельного зміщення осі променя на величину b , яку можна змінювати відносним круговим кутовим зсувом клинів в різних напрямках на кути β_6' і β_6'' від їх паралельного положення та змінням відстані a_1 між ними. Якщо кут у основи клинів α , а їх матеріал має показник заломлення n , то після першого з них 6' промінь відхилиться на кут $\phi_1' = 2 \arcsin(n \sin \alpha / 2) - 2\alpha$, а після другого (6'') кут буде дорівнювати $\phi_2'' = 2[2 \arcsin(n \sin \alpha / 2) - 2\alpha] \cos(\beta_6' + \beta_6'')$, і при $\beta = \beta_6' + \beta_6'' = \pi$ кут $\phi_2'' = 0$, а його ексцентриситет $b = a_1 \operatorname{tg} \phi_1'$. Таким чином, на другу пару клинів 7 буде надходити промінь 1, ексцентричний до осі лінзи 2, який потрібно перетворити та направити на останню через її оптичний центр під кутом $\gamma = \operatorname{arctg}[d_{nop} / (2F)]$, якому має дорівнювати кут $\phi_2'' = 2[2 \arcsin(n \sin \alpha / 2) - 2\alpha] \cos(\beta_7' + \beta_7'')$. Для цього клини 7' та 7'' необхідно зсувати вздовж кола на загальний кут $\beta = \beta_7' + \beta_7''$, тобто кожний з них на кут β_7' (β_7'') у протилежних напрямках:

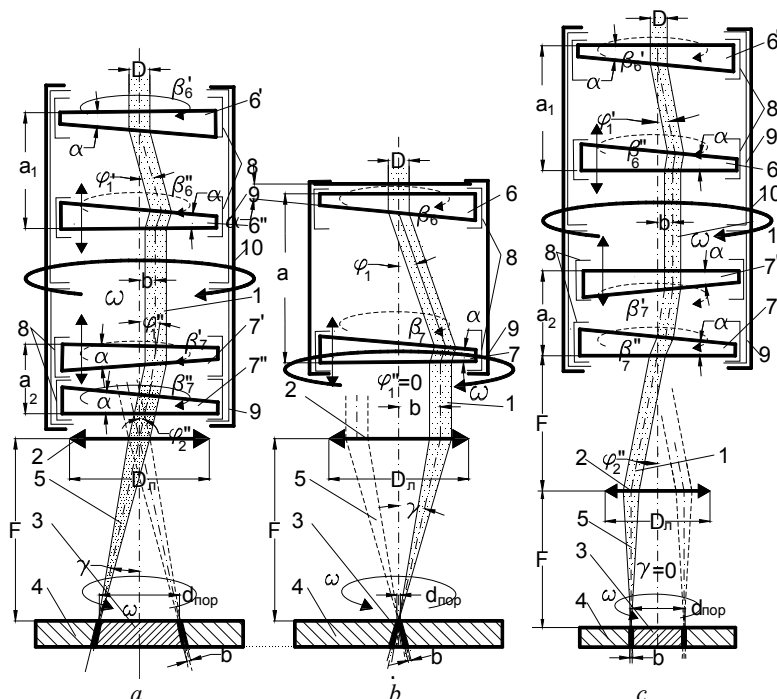


Рис. 7. Сканери для реалізації схем опромінення (рис. 4)

a – формування похилого центрального променя, b – формування асиметричного променя, c – промінь, нормальний до поверхні заготовки

(1 – лазерний промінь, 2 – лінза, 3 – порожнина, що обробляється, 4 – заготовка, 5 – каустика променя в лінзі 2, 6 – оптичні клини першого шару, 7 – оптичні клини другого шару, 8 – опори клинів, 9 – опори шару клинів, 10 – корпус сканера)

$$\beta = \beta_7' + \beta_7'' = \arccos \left\{ \left\{ \arctg \left[d_{\text{пор}} / (2F) \right] \right\} / \left\{ 2 \left[2 \arcsin(\alpha / 2) - 2\alpha \right] \right\} \right\}.$$

Тоді при обертанні сканера із розрахунковою кутовою швидкістю ω навколо осі лінзи 2, промінь 5 із параметрами, визначеними за алгоритмами табл. 1, буде утворювати отвір 3 з нахилом стінки під кутом γ .

Для формування порожнини 3 діаметром $d_{\text{пор}}$ із зворотною або прямою конусоподібністю під кутом γ за схемою b на рис. 4 використовується асиметрична форма каустики 5 променя 1, яку останній отримує за умови його ексцентричного падіння на лінзу 2 (рис. 7b). В конструкції сканера для цієї схеми достатньо використання однієї пари клинів 6 – 7 з можливістю їх відносного кругового зсуву на сумарний кут $\beta = \beta_6 + \beta_7 = \pi$ та розташування на відстані a один від іншого:

$$a = (F \operatorname{tg} \gamma + d_{\text{пор}} / 2) / \operatorname{tg} \{ 2 \arcsin [n \sin(\alpha / 2)] - 2\alpha \}.$$

Для використання сканера зі схемою рис. 7a для обробки порожнин із нормально розташованими стінками або отвори циліндричної форми (рис. 7c) необхідно накласти деякі додаткові вимоги до взаємодії клинів вузлів 6 та 7. Особливістю цієї схеми є розташування основи другого клину 7 в передній фокальній площині лінзи 2 та зустріч променя 1 з лінзою на рівні діаметру порожнини $d_{\text{пор}}$ під нормальним кутом ($\gamma = 0$). Кут нахилу променя ϕ_2'' повинен дорівнювати: $\phi_2'' = \arctg(d_{\text{пор}} / 2F)$, що визначить потрібний кут зсуву між клинами β_7 , якщо $\phi_2'' = 2 \{ 2 \arcsin [n \sin(\alpha / 2)] - 2\alpha \} \cos \beta_7$, звідки:

$$\beta_7 = \arccos \left[\arctg(d_{\text{пор}} / 2F) / 2 \{ 2 \arcsin [n \sin(\alpha / 2)] - 2\alpha \} \right] \quad \text{а кут } \phi_2' = \{ 2 \arcsin [n \sin(\alpha / 2)] - 2\alpha \} \cos(\beta_7 / 2). \quad \text{Тоді}$$

$$a_2 = b / \operatorname{tg} \phi_2'.$$

2. Сканер для вирізання отворів різних розмірів без зміння умов опромінення.

Наведені схеми пристроїв для формування порожнин вирізанням їх контурів характеризуються загальним недоліком, який проявляється в разі їх використання в індивідуальному або дрібно серійному виробництві, і проявляється в необхідності пере налаштування пристрою при зміні розміру попереку оброблювальної порожнини, точніше, діаметру отвору. По-перше, внаслідок необхідності попередньої корекції умов опромінення, по-друге, можливої потреби зміння складових елементів. Пропонується конструкція оптичної

системи, при використанні якої з вихідною комплектністю є можливість плавного регулювання діаметру обробляемого отвору за рахунок лінійного переміщення одного з її елементів. Головною перевагою системи є незмінність взаємного положення заготовки 9 та перетворюючої лінзи 8 для обробки отворів в межах визначеного діапазону їх розмірів (рис. 8). В оптичній схемі пристрою використано телескоп Галілея, створений від'ємною та позитивною лінзами 2 і 4, аксікон 3 та біпризма 5, причому перший встановлено в телескопі з можливістю переміщення вздовж осі останнього, а друга – перед лінзою 8. За умови витримання особливих вимог до параметрів оптичних елементів та їх взаємного розташування на оптичній осі лазера 1 переміщенням

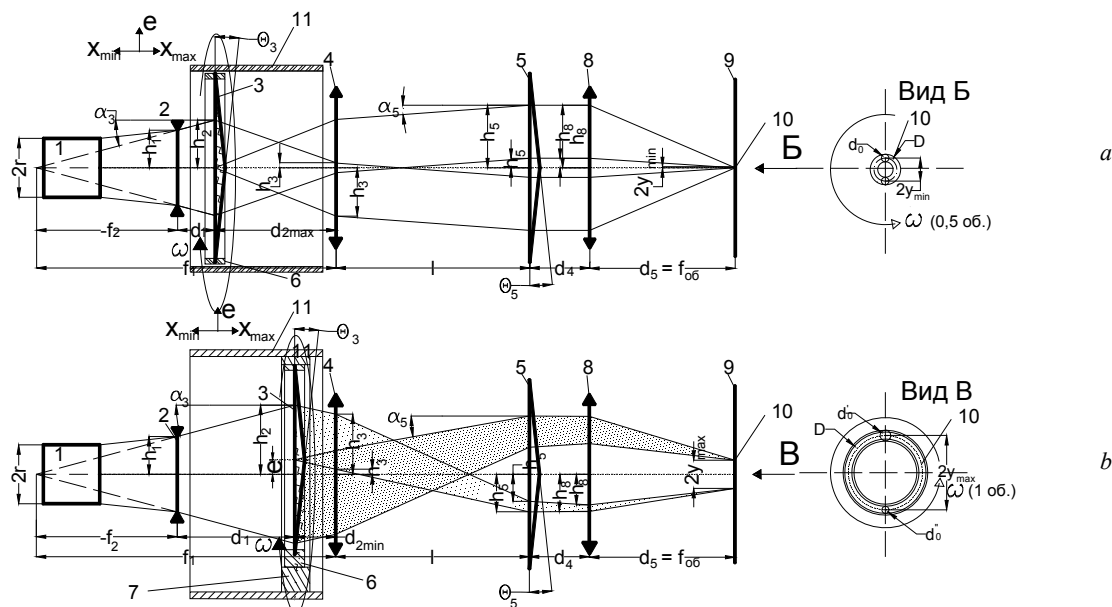


Рис. 8. Схема оптичної системи для трепанції отворів з можливістю плавного зміння діаметру

a – біпризма співвісна з променем, *b* – біпризма ексцентрична до осі променя.

(1 – лазер, 2 – 4 – телескоп Галілея, 3 – біпризма, 5 – аксікон, 6 – підшипник, 7 – втулка з ексцентричним отвором, 8 – об'єктив, 9 – заготовка, 10 – траєкторія руху зон опромінення, 11 – корпус)

аксікону 3 між від'ємною та позитивною лінзами 2 і 4 змінюється відстань між двома зонами опромінення на поверхні заготовки від y_{min} до y_{max} (практично від 0 до 10 мм) та при обертанні біпризми 5 навколо осі променя викличе кругове обертання його каустики з розміром $d_0 = F\theta$ на поверхні заготовки і за достатнім рівнем інтенсивності променя за його пів оберта створиться вирізання отвору 10 діаметром D . Додаткові можливості можна надати пристрою, якщо аксікон 3 встановити з ексцентриситетом e до осі променя (рис. 8b). Це змінить рівномірний розподіл енергії лазерного променя в зонах опромінення, що за один оберт біпризми 5 дозволить виконати два переходи операції, наприклад, вирізання отвору та видалення з поверхні заготовки навколо отвору дроссу. Деталі проектування оптичної системи див. в [12].

3. ЛТУ для обробки точних ненаскрізних отворів

Підвищення точності розмірних показників прецизійної обробки досягається багатьма шляхами, однак їх загальною особливістю є використання режимів, схем або пристроїв, які зменшують кількість розплаву, що супроводжує процес формування отворів тепловим діянням лазерного променя. Скорочення тривалості його діяння, чим досягається локальність та інтенсивність руйнування матеріалу в межах попереку отвору, є основним режимним шляхом боротьби з залишковим розплавом, але цей шлях подовжує тривалість операції та вимагає використання складного та дорогоцінного обладнання. Доопрацювання отворів іншими технологіями із спеціальним інструментом, або використання «розумної» будови операції, наприклад, адаптивної, дозволяє досягти успіху при обробці наскрізних отворів, тоді як є потреба точного керування їх глибиною для додаткового нормування об'єму лунок. Прикладом може бути обробка ненаскрізних отворів циліндричної форми в друкарських кліше глибокого друку. В цьому випадку одночасне калібрування порожнини отвору стислим газом не ефективно, тому для видалення розплаву, особливо, коли глибина лунки перевищує глибину різьки лінзи, пропонується вакуумування порожнини. На рис. 9 зображено схему лазерної технологічної установки, яка утримує лазер 1, на осі променя 4 якого розташована лінза 2 в герметичній камері 3 з ущільненнями 20, 20' зі сторони лінзи та на поверхні заготовки 6. Камеру 3 з'єднано з вагами 7, в ємність яких 16 збираються продукти ерозії безпосередньо із ерозійного факелу та відбитих від фільтру 8, встановленого похило на торці всмоктуючого патрубку 10, під'єданого через клапан 19 у вигляді пелюстки на осі 13' до входів вентилятору 17 або вакуум-наосу 18. Консольний стіл 9 ваг 7 утримується у рівновазі пружиною 11 та

вагою продуктів ерозії і його положення оцінюється датчиком 12, на базі показників якого працює блок живлення 15 лазера 1.

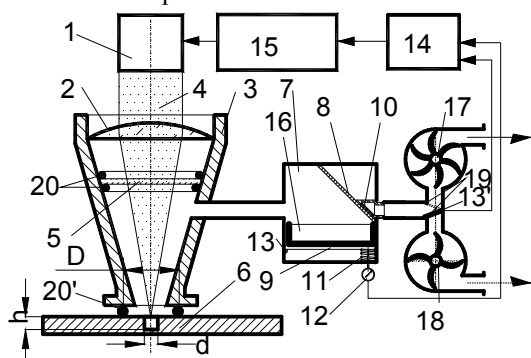


Рис. 9. Схема ЛТУ для обробки ненаскрізних лунк з керуванням їх об'ємом

(1 – лазер, 2 – лінза, 3 – камера, 4 – промінь, 5 – прозорий елемент, 6 – заготовка, 7 – ваги, 8 – фільтр, 9 – стіл, 10 – патрубок, 11 – пружина, 12 – датчик, 13 – вісь столу, 13' – пелюстка, 14 – процесор, 15 – блок живлення лазера, 16 – ємність ваг, 17 – вентилятор, 18 – вакуум насос, 19 – клапан, 20, 20' – ущільнення)

відтік тепла за рахунок зниження її теплопровідності, попереднє нагрівання матеріалу в зоні опромінення більш економічними засобами зменшують витрати енергії теплового джерела, створеного лазерним опроміненням. Використання багато імпульсного режиму обробки сприяє зменшенню похибки розмірних характеристик операції та надає можливість втручатися в хід процесу обробки в перервах між імпульсами для його корекції. Особливо розповсюджено використання пачок над коротких імпульсів, нано, піко та фемто секундної тривалості, багатократно дією яких досягається розмірний ефект і в той же час створюється можливість своєчасного припинення процесу обробки. Останній шлях суттєво збільшує тривалість операції, потребує використання цінного обладнання та високо кваліфікованого персоналу для його обслуговування, налагодження та ремонту. В запропонованій лазерній технологічній установці (рис. 10) вдалося шляхом комбінації згаданих дій досягти поєднання якості та ефективності технологічної операції.

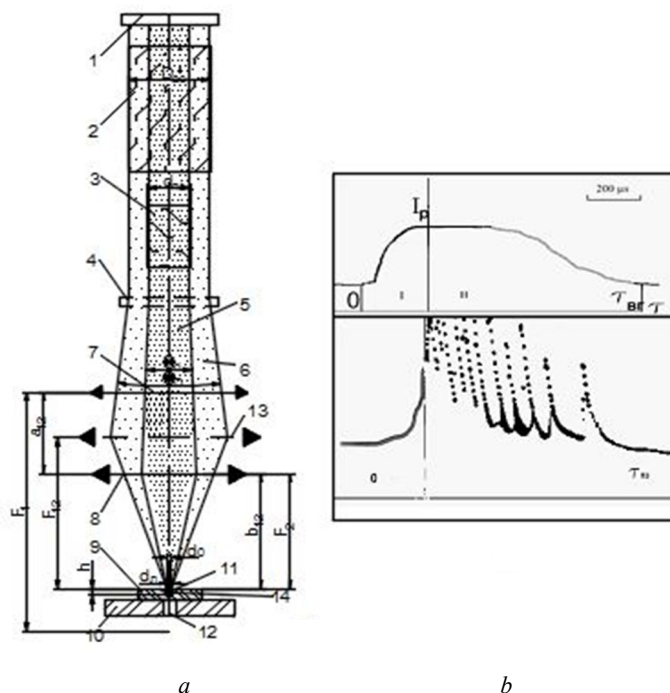


Рис. 10. Схема ЛТУ для прецизійної обробки мікро отворів імпульсами нано секундної тривалості
а – схема ЛТУ; б – часова структура імпульсу

(1–100% дзеркало, 2–активний елемент, 3–пасивний лазерний затвор, 4–50% дзеркало, 5–центральный промінь, 6–периферійний промінь, 7–лінза з отвором, 8–лінза, 9–заготовка, 10–стіл, 11–лунка, що обробляється, 12–отвір)

Обробка виконується на режимах, обраних за даними ТЗ. Під час формування лунки працюють вентилятор 17 та вакуум насос 18, який підключається до камери 3 після створення вентилятором вакууму 10^{-1} бар пелюсткою 13 клапану 19. Продукти руйнування заготовки збираються в ємності 16, розташованій на столі 9 ваг 7 і при досягненні ваги заданого рівня процесор керує блоком живлення 15 лазера 1. Для відомого матеріалу заготовки та діаметру лунки вага видаленого матеріалу пропорційна її глибині.

4. Лазерна технологічна установка для прецизійної обробки отворів нано секундними імпульсами

Для вдалого поєднання якості і ефективності обробки необхідно багатостороннє вдосконалення технологічної операції. При тепловому характері руйнування матеріалу заготовки є можливість скорочення кількості розплаву в зоні опромінення діянням на матеріал та режим нагрівання. Теплові або силові методи подрібнення його структури скорочують

Лазер цієї технологічної установки створено резонатором із дзеркал 1 та 4, в якому розташовано активний елемент 2 діаметром D (алюмоіттрієвий гранат $Y_3Al_5O_{12}: Nd^{+3}$) та пасивний лазерний затвор 3 (кристал LiF: F_2^-) діаметром d : $d = 0,83D\sqrt{\alpha}$ (α - коефіцієнт зосередженості випромінювання у попереку променя без пасивного затвору). На шляху променя за межами резонатору співвісно з ним встановлено оптичну систему із двох позитивних лінз 7 та 8, причому в першій виготовлено отвір, діаметр якого дорівнює діаметру пасивного затвору 3 d . Розмір пасивного затвору поділяє промінь лазера в резонаторі на два складових: центральний 5 та периферійний 6 промені, які після виходу із резонатора 1 – 4 перетворюються в оброблювальний інструмент різними засобами. Енергія центрального променя 5 концентрується лінзою 8 в зону діаметром $d_0 = d_{ome}$ на поверхні заготовки 9 в місці розташування оброблювального отвору (лунки) 11, а енергія периферійного променя 6 концентрується обома лінзами, які утворюють об'єктив 13 з фокусною відстанню F_{12} , в ту ж зону і того ж розміру. Під час обробки заготовка 9 встановлюється на столі 10 з отвором 12 (для обробки наскрізних отворів). 14 – профіль термічної зони, яка створюється в заготовці дією променя 6

При реалізації обраних режимів та визначених умов опромінення досягається особливий часовий та енергетичний алгоритм формування отвору. В перший період опромінення (I) (рис. 1b) з початку збудження активного елементу 2 промінь 6, створений в резонаторі, буде мати просторовий кільцевий об'єм тому, що при низькому рівні інтенсивності в ньому $I_{pa} \leq 10^5$ Вт/см² пасивний затвор 3 не просвітлюється, тобто позитивний зворотній зв'язок між дзеркалами 1 та 4 резонатору для центрального променя 5 порушено. Периферійний промінь 6 за умови нормального закону розподілу потужності в перетині активного середовища 2, менш енергетичний, ніж центральний 5, і має збільшений кут розбіжності θ_D , тому його перетворення системою лінз 7 і 8 створює в зоні опромінення діаметром $d_0 \sim d_{ome}$ теплове джерело із густиною потужності $W_{pa} = AI_{pa}$ (A – коефіцієнт поглинання), що здатне підігріти матеріал заготовки в межах зони діаметром d_{ome} не вище температури його плавлення. Після досягнення в резонаторі вищого рівня інтенсивності в період часу II (рис. 10b) пасивний затвор 3 знебарвлюється і в межах його апертури формується центральний промінь 5 з часовою пічковою структурою з інтенсивністю до 10^8 Вт/см² та тривалістю пічків ~ 60 нс. Лінзою 8 цей промінь концентрується в зону діаметром d_0 із затримкою на період τ_{zam} , достатній для підігріву матеріалу в межах зони опромінення до температури плавлення сконцентрованим периферійним променем 6. Концентрація енергії променя 5 збільшує інтенсивність в зоні опромінення до рівня 10^{10-12} Вт/см², що призводить до інтенсивної сублимації матеріалу не тільки у фокальній площині лінзи 8, а і вздовж глибини її фокусу, що гарантує само видалення матеріалу у паровій фракції без його оплавлення на дні оброблювального отвору (лунки) та її стінці. Це гарантує підвищену якість оброблених отворів у відношенні їх попереку і повздожньої форми та стабільність діаметральних розмірів.

Висновки

1. Аналіз практичних результатів лазерної прецизійної обробки показав, що різноманітність розмірних, конфігураційних та якісних показників технологічних операцій забезпечується трьома схемами опромінення, які відрізняються вхідними умовами перетворення лазерного променя оптичним елементом.
2. В залежності від обраної схеми формоутворення порожнини з урахуванням розмірів та форми її попереку і повздожнього профілю використовується копіювання форми та розмірів інструменту – каустики лазерного променя на виході оптичного елемента, або формою поверхні, що огинає її суперпозиції при формуванні контуру порожнини.
3. До кожного операційного ескізу при реалізації технологічної операції скомпоновано спрощений алгоритм визначення технологічного регламенту (режимів обробки), який враховує розмірні вимоги ТЗ до порожнини, що обробляється. Якісні вимоги до них, які потребують експериментального моделювання, забезпечуються багато імпульсною мікро обробкою з дискретизацією енергетичних та часових характеристик складових пічків та застосуванням активного контролю результатів обробки.
4. Оптичні пристрої для реалізації можливих схем формоутворення порожнин повинні відповідати наступним вимогам:
 - універсальність, тобто можливість використання для більшої кількості схем обробки;
 - дистанційна керуваність та налаштування регламенту функціонування;
 - використання простих та багато функціональних приводів їх діяння із схильністю до автоматизації;
 - довговічність та придатність до ремонту, використання уніфікованих елементів та вузлів.
6. Розроблений сканер на двох парах оптичних клинів має можливість з використанням незалежних та погоджених кругових рухів кожного з них набувати властивості, необхідні для реалізації можливих схем опромінення.
7. Шляхом використання оптичних систем нетривіальної конструкції створена можливість без необхідних пере налаштувань виконувати контурне вирізання порожнин діаметром до 15 мм, а модернізацією випромінювача на YAG: Nd^{+3} виконувати прецизійну обробку мікро отворів імпульсами нано секундної тривалості, тобто підвищеної якості.

8. Перспективним є розробка робочих креслень запропонованих приладів, їх випробування та широке розповсюдження серед виробників лазерних технологічних установок.

References

1. Вакс Е.Д. Практика прецизионной лазерной обработки. – Е.Д. Вакс, М.Н. Миленский, Л.Г. Сапрыкин. Москва: Техносфера. – 2013. – 696 с.
2. Вейко В.П. Лазерная резка металлических стентов / В.П. Вейко, В.В. Алгаер, В.Н. Смирнов // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007 – С. 108 – 112.
3. Котляров В.П. Технологічні проблеми лазерного вирізання стентів / В.П. Котляров, І. Вахдатіня, Х. Моллабаши // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2009. – № 6 – С. 81 – 87.
4. Котляров В.П. Трансфокатори для операцій лазерної обробки в поліграфії / В.П. Котляров, Д.В. Короткий // Технологія і техніка друкарства. ВПН НТУУ “КПІ”. – 2012. – №1. – С. 48 – 60.
5. Пат. 1299025 SU, МКИ В23К 26/00. Способ лазерной обработки / Кравченко В.И., Галич Г.А., Пархоменко В.Н. / Заявл. 30.12.1993, Оpubл. 27.11.1995 г. Бюл. №10. – 2 с.
6. Басиев Т.Т. Лазерная прошивка сверхглубоких микронных отверстий в различных материалах при программируемом управлении параметрами лазерной генерации / Т.Т. Басиев, А.В. Гаврилов, В.В. Осико // Квант. электроника. – 2007. – 37(1). – С. 99 – 102.
7. Holtz R. New precision applications with pulsed Nd:YAG laser / рекламный проспект фирмы Lasag A.G., 2010.
8. Вейко В.П. Лазерная микрообработка / В.П. Вейко // Санкт-Петербург: СПбГУ ИТМО. – 2005. – 110 с.
9. Котляров В.П. Технологія лазерної обробки. / В. П. Котляров – Ніжин: НДУ ім. М.Гоголя. – 2010. – 308 с.
10. Котляров В.П. Упрощенная методика технологического обеспечения операций обработки материалов лазерным лучом / В.П.Котляров, А.Н. Киященко, Н.И. Сергиенко. – ЭОМ. – 2018. – (54)6. С. 39 – 66.
11. Пат. 86593 України, МКИ В23К 26/08. Сканер пучка лазерного випромінювання / Котляров В.П., Рибкін О.І. / Заявл. 22.05.2013, Оpubл. 10.01. 2014. Бюл. №1. – 3 с.
12. Пат. 119174 України, МКИ G02В 5/02. Технологічна установка для трепанції отворів лазерним променем. / Киященко О.М., Котляров В.П. / Заявл. 24.04.2017. Оpubл. 11.09. 2017. Бюл. №17 – 3 с.

Систематизация технологических основ прецизионной лазерной обработки

В. П. Котляров • С. Г. Шкляр • М. И. Сергиенко

Аннотация. Целью работы является построение сложноподчиненной системы технологических основ (избрание схемы операции, режимное ее обеспечение и технологическое оснащение) на основе анализа реальных технических заданий на результаты обработки с учетом типоразмера заготовки и свойств ее материала.

Анализ реальных возможностей лазерной технологии и современного технологического оборудования (с учетом его стоимости и производительности) дал возможность составить зависимую классификатор схем обработки, выбрать предпочтительные механизмы формирования обрабатываемых элементов, обеспечить их соответствующими режимами обработки и надлежащей технологической оснасткой. В результате комплексного использования выполненных разработок созданы предпосылки оптимизации технологической операции, например, для достижения заданного качества обработки при минимальных материальных и временных затрат. Последнее является результатом не только использованных современных методик проектирования операций для разработанных и оригинальных схем обработки, а также применением созданной технологической оснастки при их практической реализации.

Методологической основой выполненной работы является использование гибкости лазерного луча, как заготовки для обрабатываемого инструмента, с одновременным воздействием на свойства обрабатываемого материала.

Ключевые слова: лазерная обработка, операционные эскизы, обработка сквозных отверстий и лунок, оптические схемы облучения, оснащение технологических операций лазерной обработки, качество операций, лазерное технологическое оборудование

Systematization of technological principles of precision laser machining

V. Kotlyarov, S. Shklyar, M. Sergienko

Abstract Purpose. The aim this paper is to develop complex subject system of technological principles (choice of operation scheme, its regiment and technological equipment) on the background of the analysis of the real technical tasks for the results of machining, taking into account the type of the workpiece and material properties.

Design approach. The analysis of the real possibilities of laser manufacturing technology and of modern technological equipment (taking into consideration its costs and productivity) led to the development of the dependent classifier of machining schemes, to the proper choice of prevailing mechanisms in shape generation at processing, and provided with corresponding processing regimes and proper technological equipment.

Findings. As a result of the complex use of the developed schemes, the pre-conditions for the optimization of technological processes were created. For instance, the desired processing quality was reached with minimal material waste and processing time. The latter, of course, is not only the result of the application of novel designs of technological processes but also the result of the application of the designed technological equipment for their practical realization.

Originality. Methodological basis of the present work is the use of laser beam flexibility in order transform it into the processing tool with the desired properties, with the simultaneous influence on the properties of the processed material.

Keywords: laser processing, operating sketches, machining through and blind holes, optical irradiation schemes, laser technological equipment, processing quality, laser technological equipment.

References

1. Vax, Ye.D., Milen'kiy, M.N. and Saprikin, L.G. (2013), *Practice of precision laser treatment [Praktika precizionnoy lasernoy obrabotki]*, Tehnosfera, Moskva.
2. Veyko, V.P., Algaer, V.V. and Smirnov, V.N. (2007), "Laser cutting of metallic stents", *Nauchno-tehnicheskij vestnik SPbGU ITMO*, pp. 108 – 112.
3. Kotlyarov, V.P., Vahdatiniya, I. and Mollabashi, H. (2009), "Technological problems of laser undercut of stents", *Naukovi visti NTUU "KPI"*, no. 6, pp. 81 – 87.
4. Kotlyarov, V.P. and Short, D.V. (2012), "Zoom lens for the operations of laser treatment in polygrafy", *Tehnologiya i tehnika druzarstva. VPI NTUU "KPI"*, no. 1. pp. 48 – 60.
5. Kravchenko, V.I., Galich, G. A. and Parhomenko, V. N. (1995), *Sposob lasernoy obrabotki [Method of laser treatment]* – Opubl. 27.11.1995, Pat. 1299025 SU, MKI B23K 26/00
6. Basiyev, T.T., Gavrilov, A.V. and Osiko, V.V. (2007), "Laser sewing of the super-deep micronic opening in different materials at a programmable management by system laser generation options", *Kvantovaya Elektronika*, vol. 37, no. 1, pp. 99 – 102.
7. Holtz, R. (2010), *New precision applications with pulsed Nd:YAG laser*, Lasag A.G.
8. Veyko, V.P. (2005), *Lasernaya mikro obrobka [Laser micro machining]*, SPbGU ITMO, Sankt-Peterburg, Russia.
9. Kotlyarov, V.P. (2010), "Tehnologiya lazernoi obrobki" [Technology of laser treatment], *NDU im. M. Gogolya*, Nigyn, Ukrain.
10. Kotlyarov, V.P., Kiyaschenko, A.N. and Sergienko, N.I. (2018), "Simplified methodology of the technological providing of operations of treatment of materials a laser beam", *EOM*, vol. 54, no.6. pp. 39 – 66.
11. Kotlyarov, V.P. and Rybkin, O.I. (2014), *Scanner pychka lasernogo vyrominyuvannya [Scintiscanner of bunch of laser radiation]*, Opybl. 10.01.2014. Pat. 86593 UA, MKI B23K 26/08
12. Kiyaschenko, O.M. and Kotlyarov, V.P. (2017), *Technologichna ustanovka dlya trepanacii otvoriv lasernym promenem [Technological fluidizer trepanation of holes by a laser beam]*, Opubl.11.09.2017. Pat. 119174 UA, MKI G02B 5/02