

Інженерія оптимізації температурних джерел в лазерній прецизійній обробці

В.П. Котляров¹

Received: 9 June 2023 / Revised: 20 August 2023 / Accepted: 28 August 2023

Анотація. Бажання та необхідність досягнення якісних результатів лазерної розмірної обробки, тобто перетворення останньої у прецизійну, вирішується внаслідок обрання оптимальних технологічних схем формування оброблювальних елементів та параметрів інструменту, створеного із лазерного променя. Головний сенс цих спроб зводиться до мініатюризації порцій, якими руйнується та видаляється матеріал заготовки з порожнини елемента, що формується, зверх інтенсивними, але короткими за тривалістю імпульсами електромагнітної енергії, що в умовах сталих нестабільностей процесу обробки дозволяє вчасно впливати на її хід та за високою дискретністю процесу вчасно та оперативно керувати його якісними результатами. Однак, така тактика призводить до суттєвого зниження ефективності технологічної операції. Наприклад, лінійна швидкість лінійного вирізання елементів коронарного стенту імпульсами наносекундної тривалості складає 25–30 мм/хв, тоді як при мікросекундній до 250 мм/хв., а незначне підвищення шорсткості стінок різь після останньої операції легко усувається електро хімічною обробкою. В зв'язку з тим, що процес руйнування матеріалу при лазерному опроміненні є термічним за конкуренцією темпу введення тепла та його розсіяння в тілі заготовки, особливо з металу, є можливість впливу на характер поглинання променистої енергії поверхнею заготовки, на параметри створеного теплового джерела та на теплофізичні властивості матеріалу. Оптимальні рішення цих завдань складають мету інженерії процесу опромінення в операціях прецизійної і ефективної обробки та наведені в цій роботі.

Ключові слова: лазер, лазерна розмірна обробка, технологічна операція, ефективність операції, технологічне оснащення, модернізація технологічної операції.

Вступ

Часова та предметна еволюція знань та компетенцій в лазерній техніці, зростаючі вимоги до результатів застосування лазерного променя в якості інструменту призвели до ускладнення їх виконання технологічно та коштовно. Перше – внаслідок складності керування процесами формування елемента заготовки, що обробляється, друге – зниженням продуктивності технологічних операцій за умови використання лазерів з їх низьким коефіцієнтом корисної дії та обраних шляхів досягнення замовлених результатів. А останні суттєво змінилися з часу першого використання променя для “пропалювання” наскрізного отвору в металевій

заготовці, коли результатом обробки була лише його наскрізність, далі настала черга завдання обробки отворів визначеного розміру, форми попереку (норми некруглості) та вздовж осі (не циліндричності). До цього переліку вимог пізніше додалися більш жорсткі вимоги до величини поля розсіяння розмірів отворів в партії заготовок, шорсткості та хвилястості їх стінок та стану при поверхового шару матеріалу. Необхідно враховувати складність та взаємодію впливу параметрів, характеризуючих лазерний промінь, як інструмент, на кожний з наведених якісних показників обробленого елемента, що ускладнює визначення їх рівнів та методів налаштування, зважаючи на обмежені і передбачені технологічним обладнанням шляхи їх впливу на кожний з параметрів. Це торкається процедури налагодження технологічного регламенту операції, але до її виконання останній необхідно визначити, тобто скласти режим обробки. Хотілося би дати посилання на інструкцію або публікацію для його визначення для операції розмірної обробки, але вони практично відсутні,

✉ В.П. Котляров
kotlyarovv@ukr.net

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

здається, або внаслідок горезвісної “know how, but...”, або не цікавість науковців до такої “приземленої” науки, як технологія, хоча без неї ніяка наука не може бути реалізованою. Тому вимушено можемо дати посилання на дві публікації: одну, старувату за віком, але чинну досі, в якій автор [1], штучно спрощуючи рішення рівняння теплопровідності твердих тіл (яке є трансцендентним), розробив та запропонував алгоритм проектування (не прогнозування) шести видів лазерного пропалювання (прошивки) отворів та лунок в металах та сплавах (окремо теплопровідних) імпульсами лазерної енергії гладкої форми і з пічковою регулярною структурою. Okремо надано алгоритм вирізання шляхом послідовного (з перекриттям) розташування отворів (лунок) при трепанції отворів (виїмок) більших розмірів або контуру виробу, що вирізається. Ця методика з використанням аналітичної моделі опису результату обробки вирішує проектування режимів обробки в разі одно критеріальної оцінки її результатів (за розміром отвору, лунки). В іншій публікації [2] для операцій лазерної розмірної обробки, в яких нормується декілька показників, наприклад, розміри попереку межами поля допуску, допустимі некруглість отвору та його нециліндричність, часова тривалість операції або інші техніко-економічні показники, авторами пропонується, по-перше: проведення процедури моделювання процесу обробки для нормованих показників в середовищі факторного простору параметрів, які обрані в якості керуємих процесом обробки, найчастіше експериментальним шляхом, по-друге: об'єднання моделей в єдину узагальнену функцію (наприклад, функцію бажаності, із невизнаними множниками Лагранжа або із штрафами за межами факторного простору). Втретє, пошук координат екстремуму узагальненої функції або її найбільшого стаціонарного рівня у факторному просторі, що досліджується, які створюють комплекс параметрів променю та умов опромінення, тобто режимів обробки.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Аналізуючи обидві методики, можна визначити основний та загальновідомий напрям впливу на процес формування оброблювального елемента виробу з метою керування його розмірами та якістю: підвищення інтенсивності випромінювання в зоні обробки шляхом збільшення рівня імпульсної енергії та (або) скорочення її тривалості для зменшення кількості розплаву матеріалу заготовки або його усунення з продуктів в зоні руйнування в перервах між імпульсами (пічками) енергії. Так, тривалість імпульсу τ , який використовують для формування неглибокої лунки $h \ll d$ (h, d – відповідно, її глибина та діаметр), або отвору в металевій заготовці товщиною $\delta \ll d$ потрібно зменшувати при збільшенні h або δ , та в разі необхідності надання йому циліндричної форми, або в разі заміни матеріалу

заготовки на більш теплопровідний, наприклад, сталь, латунь, бронза на мідь, алюміній, свинець, срібло, золото, тощо. Це, з точки зору автора [1], повинно зменшити відтік тепла через стінки оброблювального елемента через теплопровідність матеріалу заготовки. Такий підхід є достатнім для формування отворів (лунок) циліндричної форми в разі не перевищення їх глибини величини конфокального параметру b каустики променя в області її перетину найменшого розміру d_0 ($b = 2(\pi d_0^2 / 4\lambda)$, $d_0 = 4\lambda / \pi \theta_{div}$, де λ – довжина хвилі променя, θ_{div} – кут між крайніми променями каустики, рівний $\theta_{div} = 2 \arctg D / 2f$, в радіанах, D – діаметр променя, f – фокусна відстань оптичного елемента), тобто подвійної довжини Релея, та за умови розміщення заготовки в її межах. Умови формування інструмента з лазерного променя оптичними елементами не дуже зручно для технолога впливають на вид каустики: при необхідності формування отворів мікронних розмірів попереку d , але достатньо глибоких h , тобто з великою аспектною глибиною $h/d \geq 5 \div 10$, потрібно використання короткофокусних оптичних елементів з малою фокусною відстанню f , що протиріче умовам збільшення конфокального параметру b каустики до величини глибини. В такому випадку з'являється необхідність за обробки лунки декількома імпульсами, а в паузах між ними змінювати відносно положення оптичного елемента та заготовки на величину прирощення глибини отвору попередніми імпульсами та звуження променя для забезпечення постачання концентрованої енергії до дна отвору – місцю її поглинання, або застосувати більш довгофокусний оптичний елемент. Це спрощується використанням трансфокаторів, тобто об'єктивів з можливістю дискретного або плавного змінювання фокусної відстані та розміру попереку каустики променя. Але це практично задовольняє вимогам технологічного завдання при аспектній глибині до 10. В лабораторіях наукових підрозділів університетів та в академічних інститутах розробляють оригінальні методи обробки лунок та отворів з h/d до $150 \div 180$. Це вдається зробити з використанням над коротких, але суперінтенсивних імпульсів (пічків) тривалістю нано ($10-9$) або піко ($10-12$) секунд шляхом внутрішньої модуляції добротності резонатора лазера пасивним лазерним затвором у вигляді монокристалу $LiF: F_2^-$, який з імпульсу вільної генерації при накачування протягом 200 мкс двох стрижнів з гранатів YAG: Nd³⁺ (6.3×100 мм), формує декілька пічків (від 3 до 20) потужністю до 17.5 МВт та короткої тривалості $\tau \in 20 \div 60$ нс з періодом прямування $t \in 10 \div 20$ мкс [3]. Характеристики пічків залежать від початкового пропускання кристалу T_0 ($20 \div 70\%$) та розташування його торців (за нормаллю до осі або під кутом Брюстера). Чим щільніше кристал, тим пізніше він лавинно подібно просвітлюється, при цьому генерується менша кількість пічків у імпульсі (3), але вони коротші (2×10^{-8} с) та потужніші (до 17,5 МВт). Кристали з кутом Брюстера ще подовжують

цю тенденцію. Довжина резонатора лазера також впливає на часову структури пічків: її скорочення зменшує тривалість пічків. Автори отримали отвори діаметром $d \in 15 \div 150$ мкм в зразках товщиною $\delta \in 3 \div 20$ мм, виготовлених із інструментальних матеріалів (P18 та T15K6), жаростійкої сталі 09X18H10T5 та алюмінієвих сплавів АМГ6 та Д16. Оцінюючи зовнішні результати такої операції за світлинами та зведеною таблицею з позиції інженера технолога з лазерної обробки, можна засвідчити, що:

- дійсно, досягнуті рекордні результати з аспектною глибини отворів $h/d \in 42 \div 150$ діаметром $d \in 15 \div 150$ мкм та конусоподібністю $C \in 1/200 \div 1/500$ в усіх оброблювальних матеріалах;

- обробка виконана на дослідницькому варіанті обладнання (стенді), який утримував 2 лазери з петльовими резонаторами для фазової їх пов'язки на одній поперечній моді TEM_{00} , для модуляції якої застосовували пасивний затвор, при чому останній був скомпонованим (може, склеєним) у лінійку із монокристалів $LiF: F_2^-$ з різними початковими коефіцієнтами пропускання T_0 , тобто не на серійному технологічному обладнанні;

- хоча в публікації наведена лише світлина над глибокою лунки, у її входу видно вхідний конус, який властивий для лазерної обробки, в середній її частині є бочко подібність, яка завдячує механізму постачання променистої енергії на шляху від гирла лунки до її дна – дзеркальному її відбитті від стінки отвору, а придонна частина закінчується конусом, який, зі слів авторів, зникає в разі наскрізного отвору;

- зі світлини не видно якості та стану стінки лунки, особливо наявності тріщин, які особливо властиві твердим сплавам та високо легованим сталям внаслідок швидкого зміння їх теплового стану;

- під час обробки лунок найбільшої глибини використовувалася лінза з фокусною відстанню $f = 100$ мм, каустику якої за довжини Релея, яка дорівнює $b = 6,9$ мм, початково заглиблювали на величину $0,5 \div 1,5$ мм, хоча в межах глибини лунки не суттєво змінюється інтенсивність променя, наприклад, з початкового рівня $I_p \approx 9,9 \times 10^{10}$ Вт/см² в горловині до $6,9 \times 10^9$ Вт/см² на дні лунки, але цього достатньо для підтримання механізму випаровування матеріалу з порожнини лунки вздовж усієї глибини;

- при обробці лунок променем з таким рівнем інтенсивності головною безпекою є плазма утворення в продуктах ерозії, що може втручатися в формування каустики променя, перетвореного лінзою, або викликати його перекриття, при чому більшу небезпеку створює не інтенсивне, вибухоподібне випаровування матеріалу зі дна лунки, а утворення пари при поглинанні променистої енергії стінкою лунки за внаслідок її транспортування від гирла до дна останньої, до того ж ця перегріта, але мало рухома субстанція не тільки собою перекриває порожнину лунки, а також заважає вільному витоку донної пари у паузі між імпульсами;

- але найбільше здивування викликає низька продуктивність операції лунко утворення за розробленою схемою її реалізації: для формування однієї лунки найбільшої глибини (20 мм) використано 90 сек. машинного часу роботи лазера та її висока енергоємність: при загальній кількості імпульсів 5400 шт. (при частоті подачі цугу імпульсів 20 Гц і в кожному з них по 3 імпульси), та за імпульсної енергії 350 мДж потребується 1890 Дж, що, маючи на увазі низький ККД стрижневого лазера ($< 1\%$) з ламповим накачуванням, та додаткові витрати на організацію його роботи на одній поперечній моді TEM_{00} (для чого це, незрозуміло) його рівень може досягти $0,2 \div 0,4\%$.

Таким чином, видно, що оперуючи лише одним з важелів впливу на процес формування елементів заготовки руйнуванням його матеріалу, неможливо не тільки багато критеріальне керування результатами технологічної операції, а й виконання більш приземлених завдань, наприклад, її прискорення та здешевлення. Тому необхідне більш прискіпливе розглядання явищ, відповідних за досягнення технологічних результатів. Перед тим необхідно визначити, який канал впливу до сіх пір не розглядався та, вочевидь, не використовувався як спосіб вдосконалення режимного забезпечення та ефективного керування процесом діяння концентрованого потоку електромагнітної енергії на матеріал заготовки. Зазвичай в технології лазерної обробки і, особливо, з руйнуванням вихідного стану матеріалу заготовки, що обробляється, інструментом вважається лазерний промінь, підготовлений до цього якимось методом. Але, в дійсності, лазерний промінь лише постачає для цього свою енергію, яка, поглинаючись матеріалом, створює теплове джерело, що найчастіше і є інструментом. Формування останнього починається з етапу поглинання променистої енергії і продовжується до кінця процесу обробки. Деякі особливості керування процесом створення теплового джерела та пропозиції щодо їх різноманітності складає мету цієї оглядової публікації.

Напрями вдосконалення технологічних операцій

Перетворення направленої електромагнітної поля, яким є лазерний промінь, в теплове джерело починається під час його поглинання поверхнею заготовки в зоні розташування оброблюваного в ній елементу шляхом електронної та фононної (решіткової) теплопровідності у металів та діянням на структуру неметалів. Це загально відомі процеси, але крім величин, відповідних за поглинання енергії таких, як коефіцієнт поверхневого поглинання A (або відбиття $R = 1 - A$) та коефіцієнта глибинного поглинання α (Бугера-Ламберта), корисною характеристикою створеного теплового джерела є нормований коефіцієнт поглинання B , який описує вид поглинання (поверхневий або об'ємний) в залежності від властивостей матеріалу заготовки

та режиму опромінення. Данні про такий коефіцієнт не часто зустрічаються в літературі.

$$B = k\alpha L_e / cA I_p$$

де: k – коефіцієнт теплопровідності матеріалу виробу (Вт/м град), α – коефіцієнт поглинання Бугера-Ламберта (см^{-1}), L_B – питома енергія випари (кал/г), c – питома теплоємність (кал/грам град), I_p – інтенсивність лазерного променя ($\text{Вт}/\text{см}^2$), $W_p = A I_p$ – густина потужності теплового джерела, створеного в результаті опромінення ($\text{Вт}/\text{см}^2$). Якщо коефіцієнт $B > 0,1$, то сформовано поверхнєве теплове джерело і матеріал видаляється випаровуванням з поверхні його розплаву, поступово збільшуючи глибину утворюваної лунки протягом тривалості імпульсу випромінювання, а при $B < 0,1$ – лунка формується ступінчасто кожним пічком випромінювання сублімацією прогрітого шару матеріалу, минаючи процес плавлення, тобто вибухоподібно з самоочищенням стінок лунки. Порівняємо значення цього коефіцієнту у випадку обробки отворів в платах із конструкційної кераміки 22ХС. Для неї (Al_2O_3) при майже однаковому рівні коефіцієнта поверхневого поглинання випромінювання від CO_2 ($\lambda = 10,6$ мкм) та $YAG: Nd^{+3}$ ($\lambda = 1,06$ мкм) $A_{10,6} \approx A_{1,06}$, значення нормованого коефіцієнта дорівнює: $B_{10,6} = 10$ ($\alpha_{10,6} = 10^{-4} \text{ см}^{-1}$; $W_p = A I_p = 7 \times 10^6 \text{ Вт}/\text{см}^2$), а $B_{1,06} = 10^{-4}$ ($\alpha_{1,06} = 30 \text{ см}^{-1}$; $W_p = A I_p = 4 \times 10^8 \text{ Вт}/\text{см}^2$), тобто в останньому випадку порожнина сформована вибухоподібним видаленням матеріалу з лунки. Стінка порожнини має пористу зернисту структуру без ознак присутності скловидного матеріалу, який є сумішшю фаз α і γ , та її розміри та профіль близькі до заданих.

Однак, не для всякого діелектричного матеріалу можна рекомендувати формування об'ємного теплового джерела, як кращого теплового інструменту вирізання або перфорації отворів. Це стосується шарових матеріалів, таких, як природний шаровий кварц у вигляді слюди. Дифузія між окремими шарами, як природне явище, утримує їх доволі міцно, якщо не діяти силовими або термічними тангенціальними навантаженнями на площину спайності, або при нормальній деформації із значним прогином виробу із слюди. Розшарування супроводжує і недолугі спроби лазерного вирізання шляхом накладення наскрізних отворів для формування суцільного різку. Чому та як заважає розшарування слюди при виготовленні з неї виробів? Так, якщо виготовляється теплостійке вікно для нагляду (контролю) за процесами в камері з високою температурою (до 1500°C) не допускається розшарування виробу в зоні нагляду тому, що губиться така властивість матеріалу, як прозорість. Пам'ятаючи, що чинником розшарування є механічний вплив на матеріал в зоні обробки, який створюється внаслідок підвищення тиску в продуктах ерозії за енергійним руйнуванням матеріалу, наприклад, у вибухоподібному результаті впливу теплового діяння, не рекомендується створювати ви-

соко інтенсивні джерела об'ємного типу для організації ефективного само видалення матеріалу або через його сублімацію, або випаровуванням. Тому бажано обирати лазерний постачальник енергії у вигляді променя з довжиною хвилі, для якого слюда непрозора, що б виключити після поглинання його енергії в площинах спайності шарів створення внутрішніх теплових джерел розривної дії. Тобто треба обирати лазери, які здатні генерувати промені за межами діапазону довжин хвиль, для яких слюда є прозорою ($\lambda \in 0,35 \div 9,60$ мкм) та мати можливість подавати енергію імпульсно та з частотою $\nu \sim 10$ кГц:

– імпульсний лазер на CO_2 ($\lambda = 10,6$ мкм, $P_{\text{ср}} = 10$ Вт, $\nu \in 0,1 \div 15$ кГц)

– лазер на N_2 ($\lambda = 0,337$ мкм, $P_{\text{ср}} = 20$ Вт, $\nu \in 0,1 \div 100$ кГц).

Перший лазер дозволяє у м'якому режимі руйнувати слюду з розплавленням та частковим випаровуванням при відносному переміщенні вздовж контуру виробу, що вирізається. Це зменшує тиск в продуктах ерозії, а сумісне використання технологічного струменя повітря (газу) буде заважати діянню тангенціальних навантажень на стінки різку, що виключить або зменшить ширину розшарованої зони та закріпить крайку виробу її оплавленням, і це задовольнить вимоги до виробу віконців, але збільшить його товщину оплавленими крайками.

Другий лазер краще через самостійність організації імпульсного характеру генерації (лазер на само обмежених переходах), має кращі просторові характеристики пучка випромінювання $M^2 \sim 1.2$ ($M^2 = 1/k$, де $k = BPP \times \pi / \lambda$, а $BPP = d_0 \theta / 4$ рад.мкм – *beamer parameter product* [4]), що дозволяє гостріше концентрувати його енергію, і більшу фотонну енергію $E_{\text{ф}} = ch/\lambda$ (c – швидкість світла, h – постійна Планка), що дозволяє зменшити її питомий внесок та обмежити розмір дефектної зони. Для зменшення енергетичного вкладу в процес випаровування можна використати пошарове руйнування слюди. Але ці технологічні прийоми не здатні повністю виключити потовщення виробу тому, що межі шарів не визначені і кожний прохід може зачіпляти сусідній шар, що послабляє дифузійні між шарові зв'язки. Крім того, така організація операції мало продуктивна. Тому при необхідності прискорення виготовлення виробів із телевізійної слюди СТА (мусковіт із щільністю $\rho = 2,87 \times 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$, теплопровідністю $k = 0,48 \text{ Вт}/\text{м.град}$, з температурою випари $T_k = 1530^\circ\text{C}$ та межею міцності при розтягуванні $\sigma_b = 180 \text{ МПа}$) завтовшки $0,05$ мм використовувалося наскрізне однопрохідне вирізання виробів розмірами 2×4 мм. Для утримання слюди від розшарування, що важливо при її використанні в якості діелектричної прокладки, від товщини якої залежить чутливість приладу, використано попереднє стискування заготовки – листа слюди перед лазерним розкриєм [5]. При цьому використано відому особливість слюди, як найкращого твердого діелектрика (електрична міцність $E_{\text{пр}} = 2 \times 10^8 \text{ В}/\text{м}$; діелектрич-

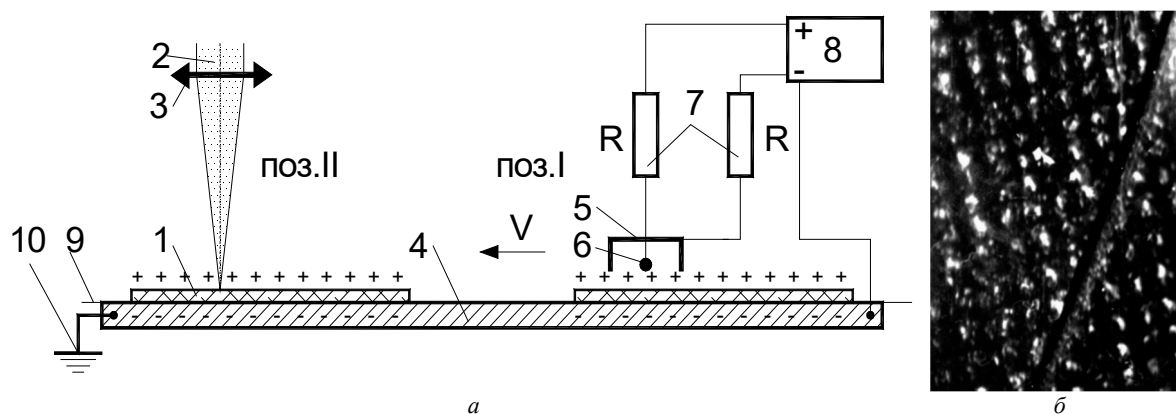


Рис. 1. Схема вирізання виробу із слюди завтовшки 0.05 мм (а) та зовнішній вид різі (б): 1 – заготівка, 2 – лазерний промінь, 3 – лінза, 4 – мідна пластина – електрод, 5 – екран коронного розрядника, 6 – анод, 7 – резистор, 8 – блок живлення, 9 – прокладка з фторопласту, 10 – нейтраль

на проникність $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$ Ф/м; відносна діелектрична проникність $\varepsilon = 7$). З допомогою коронного розрядника 5–8 заготівку слюди 1, розташовану на електроді 4 через прокладку з плівки фторопласту F4 9, притискують до поверхні електроду з міді нанесенням позитивного розряду на його верхню поверхню (поз. I). Далі, заготівку переміщують у робочу зону лазерного променя 2 (поз. II) і виконують операцію вирізання виробу на визначених режимах (потужність променя та його розмір на поверхні заготівки, тривалість імпульсів, частота їх надходження та швидкість відносного переміщення з променем $V = 2$ м/хв). Зусилля притиску досягає 2,4 МПа, що, природно, захищає структуру виробу від розшарування. Для визволення виготовленого виробу від дії електростатичних сил потрібно змінити полярність електродів на зворотному шляху заготівки в поз. I. Ця операція виконувалася з $\sim 0\%$ браку замість виготовлення виробів зі слюди діючими на той момент виробничими технологіями: шляхом відштамповування на безззорних штампах (97% браку) або лезовим торцевим вирізанням виробу вздовж його контуру із листової заготівки обтиснутої з обох сторін металевими шаблонами виробу (90% браку).

“М’який” режим опромінення, який для металевих заготівок викликає плавлення металу без утворення парової фракції, використовується в операціях газолазерного розкрою листового матеріалу з метою економічної витрати променистої енергії тому, що для випаровування 1 кг сталеві заготівки потрібно в ~ 100 раз більше теплової енергії, ніж для його розплавлення ($61,2 \times 10^5$ та $84,0 \times 10^3$ Дж/кг відповідно). Тому для видалення матеріалу вздовж контуру вирізання використовується тепловий механізм руйнування (плавлення) моноліту листової заготівки діянням лазерного променя, а для очищення різі від розплаву та надання йому наскрізності – застосовують кінетичну енергію струменя газу, яким продувається його порожнина співвісно з променем або із похилого зовнішнього сопла.

Природно, що така організація операції лазерного розкроювання листів може застосовуватися лише за наскрізним характером різі. Аналізуючи зауваження, які були викликані оціненням технологічних та економічних характеристик операцій виготовлення отворів (лунк) мікронних розмірів, але достатньо глибоких (аспектна глибина лунки, або довжина отвору, яка дорівнює товщині заготівки, $h/d > 50 \div 150$), можна зробити висновок, що вони викликані використанням однодовгих променів з імпульсною подачею нано та піко секундних імпульсів, які забезпечує високий рівень інтенсивності в зоні опромінення та вздовж достатньо протяжної глибини різкості каустики перетвореного лінзою променя (подвійної довжини Релея). Треба також нагадати, що транспортування високо інтенсивного променя вздовж отвору мікронного розміру реалізується шляхом багатократного його відбиттям від стінки лунки, що додатково та неконтрольовано впливає на повздовжню форму останньої і супроводжується створенням додаткової пари, яка іонізується, створюючи неочікуване теплове джерело - перешкоду проходженню променя до дна. Тому спеціалістами відомої у минулому фірми LASAG A.G. (Швейцарія) [6] була розроблена технологічна операція газу лазерного свердлення над глибоких отворів в металах імпульсами мікроросекундної тривалості, яке супроводжується подачею стислого газу в порожнину отвору (рис. 2).

Лазерний промінь 1 концентрується на поверхню заготівки 8 лінзою 2, яка розташована в копусі 3. Її фокусна відстань f обирається з урахуванням обраного розміру зони опромінення d_0 та кута розбіжності променя θ : $f = d_0 / \theta$. Для отвору $\varnothing 0,05$ мм розрахований діаметр зони опромінення складе 0.04 мм, що для променя з кутом розходження $\theta = 2$ мрад потрібна лінза з $f = 20$ мм. Конфокальний параметр каустики б променя після цієї лінзи: $b = 2(\pi d_0^2 / 4\lambda) = 2 \times \pi \times 0,04^2 / (4 \times 0,00106) = 2.37$ мм, що менше товщини заготівки h . За

багато імпульсної обробки лунки випаровуванням матеріалу необхідно було би періодично в між імпульсні інтервали зміщувати лінзу 2 відносно заготовки 8 на величину прирощення глибини лунки одним, чи декількома імпульсами, що б підтримати обраний рівень інтенсивності на її дні 10, але цьому заважає горло лунки, діафрагмуючи промінь. Якщо в межах глибини лунки h рівень інтенсивності зменшиться нижче 10^6 Вт/см² для більшості металів випаровування припиниться, змінюючи їх руйнування на плавлення дна лунки на глибину h_p та отвердіння розплаву в перервах між імпульсами. При збільшенні кількості імпульсів в таких умовах опромінення прирощення глибини лунки не спостерігатиметься та для подовження обробки необхідно або підвищення інтенсивності променя на дні лунки подовженням каустики, використовуючи трансформатор, або збільшення імпульсної енергії. Але є можливий шлях штучного видалення розплаву, наприклад, струменем технологічного газу (повітря).

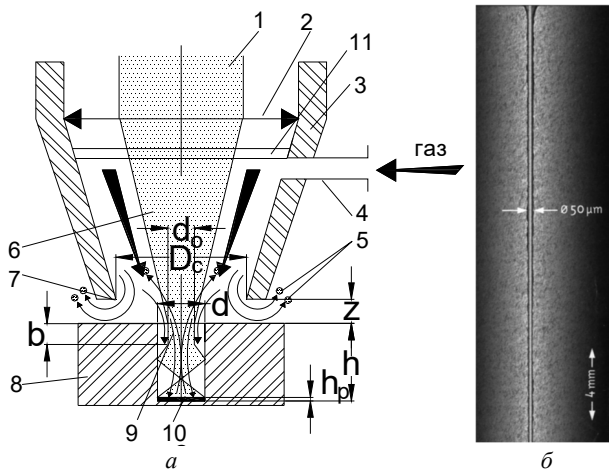


Рис. 2. Схема операції газолазерної обробки отвору і її оснащення (а) та профіль отвору (б) (1 – лазерний промінь, 2 – лінза, 3 – корпус лінзи, 4 – штуцер для подачі стислого газу, 5 – бризки розплаву, 6 – каустика променя в лінзі 2, 7 – сопло для подачі газу в зону опромінення, 8 – заготовка, 9 – глибина різкості лінзи довжиною b , 10 – дно лунки, 11 – захисний оптичний елемент)

Авторами цієї схеми досліджено та впроваджено у виробництві видалення розплаву струменем газу, співвісним з променем через сопло 7, розташованим на корпусі 3. Тиск в такому струмені повинен бути $\geq 2,0$ МПа, діаметр сопла $7 D_c = 0,3$ мм для отвору $d = 0,05$ мм, а його торець розташовується на відстані $z \in 0,01 \div 0,03$ мм над поверхнею заготовки, при чому із збільшенням z прискорюється обробка. Оцінюючи якість отвору з приведеної світліни його повздовжнього профілю, можна відмітити циліндричність, якість стінки та відсутність

конусу у його горлі. Але можна припустити складність формування струменя такого тиску та його застосування для заготовок тендітних або із не міцних матеріалів.

Відомі спроби подібної організації операцій виготовлення отворів за допомогою видалення розплаву протягом дії лазерного променя, які, на перший погляд, зручніші в реалізації та з використанням більш доступного обладнання. Вони відрізняються від наведеного вище способу тим, що для видалення розплаву зі дна глибокої лунки використовують вакуум, який створюють в герметичній камері над вхідною частиною лунки, отвору (рис. 3) [7]¹. На шляху променя від лазера 1 розташовують лінзу 2 у корпусі 3, який через ущільнення 11 спирається на поверхню заготовки над місцем розташування зони опромінення. Порожнина корпусу під'єднана через дросель 5 із регульованою апертурою d_1 до вакуум насоса 6, а також до датчику тиску 7, чиї контакти підключені до блоку 8 живлення лазера 1. Опромінення заготовки починають на режимах, необхідних для формування отвору (лунки) потрібних розміру та форми шляхом випаровування матеріалу до глибини h_0 , яка дорівнюватиме конфокальному параметру b каустики променя після лінзи 2. Далі промінь буде розширюватися із зменшенням його інтенсивності на дні лунки, відбиваючись від її стінки, що змінить механізм руйнування матеріалу в його межах на формування розплавленого шару. Якщо в корпусі 3 створено відкачкою повітря вакуум відповідного тиску, то рідка фракція шару 9 буде відсмоктуватися краплинами 10 через отвір в корпусі 3 до створення наскрізного каналу отвору діаметром d який повинен дорівнювати діаметру його горла тому, що доведення до видалення матеріалу зі стінки лунки потребує час для його розплавлення до щільності ρ яка ослабить зв'язок з монолітом. На дні лунки такий час є тому, що там збирається практично уся промениста енергія, каналізуючись її стінкою. Далі хід операції регламентується обраним шляхом контролю її розмірного результату. За одним з них вакуумметр 7 налаштовується на розрахунковий рівень тиску в камері 3 і при досягненні заданого рівня з урахуванням наявності наскрізного отвору заданого розміру вимикає роботу лазера. За другим сценарієм автоматизується контроль за його розміром шляхом створення такого тиску в камері 3, який не зможе утримувати заготовку з обробленим отвором у всякому стані, утримуючись різницею атмосферного тиску та тиску в камері за наявності в заготовці отвору потрібного розміру при відкачуванні повітря через отвір у дроселі діаметром d_1 ,

$$d_1 = d(1 - G/S)^{-0.5}$$

де: G – вага заготовки з отвором, S – площа поверхні

¹ пріоритет винаходу 17.06.1985 р. як патентного свідоцтва СРСР

заготівки, що ущільнюється: $\pi D^2/4$, p – тиск навколо пристрою. Поки розмір отвору не перевищує найменшого граничного значення, перепад тиску по обидві сторони заготівки залишається достатнім для її утримання в робочому положенні, і обробка отвору черговими імпульсами лазерного випромінювання призведе до збільшення його розміру та при досягненні останнім нижньої межі поля допуску зусилля для втримання заготівки 4 стане недостатнім і вона відпадає під дією власної ваги, а підвищення тиску в порожнині корпусу 3 через контакти вакуумметра вимикне лазер 1, що забезпечить автоматизацію процесу обробки.

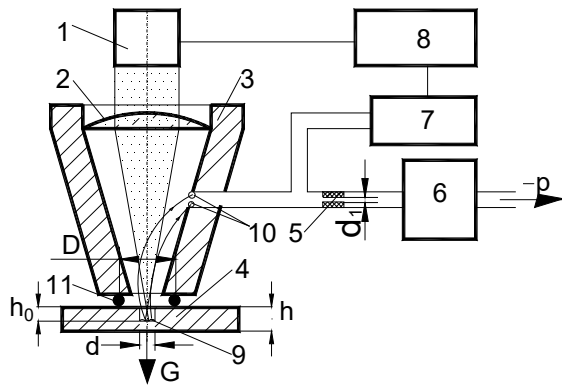


Рис. 3. Схема пристрою для обробки глибоких мікроотворів (лунок) з вакуумним видаленням продуктів ерозії з їх порожнини: 1 – лазер, 2 – лінза, 3 – корпус лінзи, 4 – заготівка, 5 – дросель, 6 – вакуум насос, 7 – вакуумметр, 8 – блок живлення лазера, 9 – розплав на дні лунки, що обробляється, 10 – продукти лазерної ерозії матеріалу заготовки

Переваги та недоліки такої схеми обробки очевидні: по-перше, вакуум до $10^{2\pm 1}$ Па це досяжний (середній) рівень для звичайного (механічного або поглинального) вакуум насоса; напрям відсмоктування продуктів руйнування матеріалу співпадає з напрямом його само видалення під дією променя у між імпульсних перервах, тобто не заважає останньому постачати енергію; низький як (для розмірної обробки) рівень інтенсивності променя на стінці за межами глибини різкості лінзи (конфокального параметру каустики) буде мати менший вплив на стінку отвору, чим підтримується заданий розмір та форма повздовжнього профілю отвору, сформованого променем в межах глибини різкості лінзи; а частково оплаваючись, стінка отвору надбає гладку поверхню, що знижує ризик утримуватися на ній в мікро комірках (дряпинах після інших шляхів свердлення: механічного та електро ерозійного) тій субстанції, що транспортується через отвір, наприклад, солярці у корпусах форсунок дизелів, яка

завдяки високій температурі коксується та поступово зменшує витрати палива і погіршує, так звану, приємність, дизеля. До недоліків можна віднести важкість герметизації порожнини корпусу лінзи над поверхнею заготівки у разі її складної просторової форми.

Подібна схема постійного оновлення теплового джерела в порожнині отвору, що обробляється в багато імпульсному режимі, але за іншим шляхом створення вакууму при додатковому захисті поверхні лінзи, яка обернута до заготівки, зображена на рис. 4 [7]². Тиском газу P та його витратою через систему сопел 5 та 6, розміщених в корпусі 2, створюється розрідження в герметичній порожнині, утвореній в останньому лінзою 1 та заготівкою 4 внаслідок ежекторного ефекту, що здатне утримувати заготівку 4 в робочій позиції для обробки. Парові продукти ерозійного факелу на етапі руйнування матеріалу заготівки випаровуванням та розплавлена його фракція 9 далі перехватимуться на шляху до лінзи плоским струменем газу між соплами 5 та 6 і видалятимуться із корпусу 2, захищаючи поверхню лінзи 1 від руйнування або її забруднення. По мірі заглиблення лунки до формування її наскрізного каналу та досягнення розміру d_0 його попереку нижньої межі допуску підсос повітря через нього зменшить рівень вакууму над заготівкою, який був потрібним для утримання її у підвищеному стані, і вона відпаде, як це відбувається в попередньому пристрої.

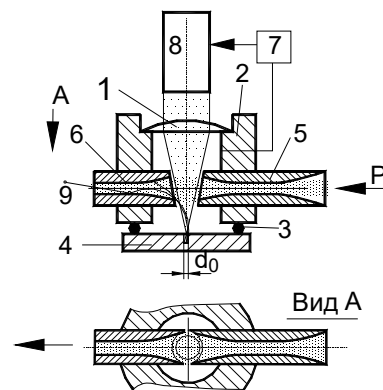


Рис. 4. Схема пристрою для лазерної прецизійної обробки отворів з використанням ежекторного ефекту: 1 – лінза, 2 – корпус, 3 – ущільнення, 4 – заготівка, 5 – плоске сопло для наддуву газу, 6 – приймальне сопло для випуску газу, 7 – блок керування лазером, 8 – лазер, 9 – продукти ерозії

Способи створення додаткових теплових джерел в заготівці

Хоча в наведених вище засобах змінюються вид та алгоритм створення теплових джерел під час лазерної розмірної обробки, ці зміни вносяться через вплив на лазерний промінь, тобто на його просторову струк-

² пріоритет винаходу 07.03.1984 р. як патентного свідоцтва СРСР

туру, довжину хвилі випромінювання, інтенсивність в його попереку, часовий порядок постачання енергії та умови опромінення, але залишається без уваги властивості іншого співучасника процесу – заготовки, в тому числі її матеріалу. Прийнято, і це справедливо, вважати, що підвищена теплопровідність металів є поганою властивістю матеріалу заготовки у випадку її розмірної обробки. Тому при виготовленні виробу з теплопровідних металів та сплавів на базі платини, срібла, золота, алюмінію та міді тощо, в режимах опромінення скорочується тривалість разових складових порцій імпульсів енергії (пічків) та формуються перерви між ними для видалення продуктів ерозії матеріалу заготовки та виключення накопичення тепла у вигляді розплаву в оброблювальній порожнині. Це її “осування” позитивно впливає на якість обробки, а за умови збереження температури її стінки на рівні температури кристалізації (отвердіння) матеріалу до надходження чергової порції енергії – сприяє економії останньої, тобто зменшенню енергоємності технологічної операції. Оце майже усі можливості її “інструментальної” оптимізації. Але можна подовжити останню, використовуючи теплові властивості оброблювального матеріалу, в більшій мірі, металевого. Для цього зробимо аналіз теплофізичних властивостей металів та сплавів, найчастіших представників конструкційних та інструментальних матеріалів (табл. 1), в їх можливих станах: у нормалізованому або відпаленому та кольорових сплавів у гартованому, відпущеному та після старіння (табл. 2).

Складність створення та керування тепловим джерелом, який є продуктом діяння лазерного променя на матеріал заготовки, визначається постійним впливом на цей процес його теплофізичних властивостей (теплопровідності k , теплоємності c_p та щільності ρ), які мають високий рівень значень для металевих заготовок, що сприяє відтоку тепла в холодне оточення з об'єму металу в зоні опромінення і зниженню ефективності використання теплової енергії та керованості формою та змістом створюваного теплового джерела. Це посилюється мінливістю рівня температури вздовж його меж та достатньо великим коефіцієнтом температуропровідності матеріалу a . Для зменшення впливу цих факторів, як видно з табл. 1, у таких сплавах, як вуглецеві та леговані сталі, є потреба в попередньому нагріванні останніх тому, що це знижує теплофізичні властивості, які відповідають за відвід тепла (k та a) та підіймає його витрати на свої потреби (c_p). Для сплавів з кольоровими металами Cu та Al , (бронза, латунь, силумін та дюралюмін тощо) суттєво зростають теплопровідність і коефіцієнт температуропровідності та трохи теплоємність (табл. 1). Термообробка (загартування, відпал та старіння) роблять їх міцнішими (σ_b), твердішими (НВ) за рахунок зменшення пластичності (табл. 2) тому температурний вплив на кольорові сплави виключається і може бути замінений на деформаційне подрібнення зони опромінення відцентровими інденторами при поверхнево-пластичній (ППД) або ультразвуковій обробці (УЗ). Деформаційний вплив на

Таблиця 1. Температурні залежності теплофізичних характеристик сплавів

Величини	ρ 27°C	ρ 877°C	$T_{пл}$	T_b	c_p 27°C	c_p 727°C	k 27°C	k 527°C	a 27°C	a 527°C
розмірність матеріал	10 ³ кг/м ³	10 ³ кг/м ³	°C	°C	кДж/ кг.град	кДж/ кг.град	Вт/ м град	Вт/ м град	10 ⁻⁶ м ² /с	10 ⁻⁶ м ² /с
Сталь У8	7.839	7.652	1371	2580	0,462	0,624	50	24	12.78	5.28
Сталь 18Х2Н4ВА	7.950	7.736	1425	2861	0.476	0.672	36	33	9.51	6.49
Латунь ЛС59	8.400	–	900	2490	0.377	0,5	110	180	3.46	–
Дюралюмін Д16Т	2.780	–	650	2200	0.921	1.172	169	205	65.5	–

Таблиця 2. Механічні властивості кольорових сплавів

Величини	ρ 27°C	σ_b	σ_b $TO_{заг}$	σ_b $TO_{ст}$	НВ відпал	НВ $TO_{заг}$	НВ $TO_{ст}$
розмірність матеріал	10 ³ кг/м ³	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа	МПа
Латунь ЛС59	8.400	230.5	392	392	58	–	204 ППД
Дюралюмін Д16Т	2.780	185	485	470	42	120	120

структуру можна рекомендувати також для покращення лазерної розмірної обробки чистих металів

Крім рекомендації попереднього нагрівання заготовки із залізо вуглецевих сплавів за бажанням заміни механообробки внаслідок низької її ефективності або малого розміру отвору ($< 0,5$ мм), необхідність додаткового оснащення операції для обертання свердла із швидкістю, достатньої для реалізації різання за нормативними режимами обробки (для фактичного сполучення матеріалу виробу та ріжучого інструменту) на лазерну не рекомендується проста заміна виду інструменту в існуючій технологічній операції. Спочатку потрібно приготувати заготовку для нового виду обробки, зважаючи на відмінність механізмів руйнування її матеріалу в тій операції, що потребує заміни, та в лазерній. При цьому можливі ситуації можна звести до кількох варіантів.

1. Якщо виріб за діючим технологічним процесом його виготовлення буде супроводжуватися об'ємною термічною обробкою (ТО), наприклад, гартуванням або одним із видів поверхневої хіміко-термічної обробки (ХТО) (цементування, азотування, ціанування або дифузійне легування) в зоні розташування обробляемого елемента, які наслідують усі операції з різанням матеріалу лезовим інструментом, то потрібний переніс нової операції лазерного свердлення в чергу за ТО. Це дозволить при використанні оптимальних схем та режимів лазерного опромінення в новій операції досягти підвищення якісних та кількісних результатів. Наприклад, для досягнення заданих кресленням результатів операції виготовлення отворів $\varnothing 0,25 \pm 0,01$ мм в кількості 9 штук в одній заготовці – корпусу форсунок дизеля із сталі 18X2H4BA розмірна вимога до отворів накладає обмеження на похибку їх діаметр в межах поля допуску 0,02 мм. Але це не уся інформація про вимоги до якості отворів, тому що цей допуск обмежує не тільки діаметр отворів “на просвіт”, він розповсюджується на допустиму похибку некруглості отвору в будь-якому його попереку вздовж осі, а це також обмежує таку похибку, як “не циліндричність”. За традиційною операцією ці норми виконувались, але дорогим шляхом: свердло із твердого сплаву T15K6 діаметром 0,25 мм, виготовлене в Японії, коштувало 5\$ (1975 р.) при його стійкості 100 отворів. Крім того, що б досягти рекомендованої відповідним довідником швидкості різання таким свердлом матеріалу корпусу в його стані після відпаду $V = 23$ м/хв потрібна швидкість обертання 30 000 об/хв. До станка, створеного для таких умов обертання, був сконструюваний та виготовлений цанговий патрон з обмеженням на радіальне биття свердла 0,001 мм. При проектуванні операції лазерної обробки отворів з наведеними вимогами до їх якості першою спробою була зміна існуючої операції тому в експериментах використовувалися заготовки того ж стану – після відпаду. Результатом багаточисельних експериментів було досягнення величини поля розсіяння розмірів отворів в їх партії $6S_d = 0,056$ мм

(S_d – середнє квадратичне відхилення розміру), тобто майже у 3 рази більше поля допуску на діаметр, причому отвори мали конусоподібність $C = 1:80$, що більше допустимого $[C] = 1:200$. Тому після ознайомлення з переліком операцій виготовлення корпусу для експериментів були підготовлені зразки виробів без отворів, які були за планом цементовані на глибину 2 мм, тобто товщину стінки, в якій оброблялися отвори. Після відповідної корекції режимів опромінення оброблена партія корпусів мала поле розсіяння діаметральних розмірів отворів $6S_d = 0,03$ мм та меншу конусоподібність $C = 1:120$. Для подальшого зменшення діаметральної похибки до допустимого рівня (поля допуску 0,02 мм) була використана система активного контролю на базі витратоміра у вигляді одно метрової скляної трубки з конічним отвором та поплавком, який повинен був займати відповідну позицію вздовж висоти трубки, яку було поділено на 9 зон по кількості отворів. Вимогу до підвищеній циліндричності отворів було скасовано до досягнутого рівня внаслідок не доведеної її необхідності, декілька комплектів форсунок було випробувано в період навігації на річних судах при позитивній оцінці їх якості, головне у відсутності зниження приємності дизелей протягом випробувань.

2. Для лазерної розмірної обробки виробів, матеріал яких здатен до ТО із перетворенням структури у дрібно зернисту, але в технологічному процесі це не передбачено, можна застосувати їх тимчасове гартування або нормалізацію з поверненням до вихідного стану відпадом після операції лазерної обробки. Але це ускладнює та подовжує процес виготовлення виробу та виробничу логістику, що здорожує виріб. Тому пропонується метод локального нагрівання матеріалу виробу в зоні опромінення або з метою змінення його стану, наприклад, з використанням лазерної технологічної установки (ЛТУ), схема якої та алгоритм роботи зображені на рис. 5 [8]. В якості джерела випромінювання може використовуватися стрижневий або дисковий лазер 1-2-3 з ламповим або світлодіодним накачуванням. Відмінність лазера від відомих моделей полягає в конструкції модулятора добротності його резонатора, у якого 100% дзеркало 1 виготовлено у вигляді мембрани з пружинної сталі 65Г (60С2) завтовшки 0,3 мм, чия робоча поверхня плоска, полірована та золочена, а тильна опирається на постійний магніт кільцевої форми з метою намагнічування матеріалу дзеркала як S або N полюсу та защемлена в корпусі 14. Якщо дзеркало 1 зроблено з магнітного матеріалу, то при дії на нього магнітним полем електромагніту 6 із сердечником 7, які встановлено співвісно з дзеркалом та з його тилу, останнє буде вигинатися від плоского стану (b) до опуклого або увігнутого при живленні магніту 6 постійним струмом, та змінювати своє кривизну періодично із змінення струменя в електромагніті 6. На рис. 5а зображена опукла кривизна дзеркала 1, в такому випадку разом із плоским вихідним дзеркалом 3 створюється нестійка конфігурація резонатора 1–3 з

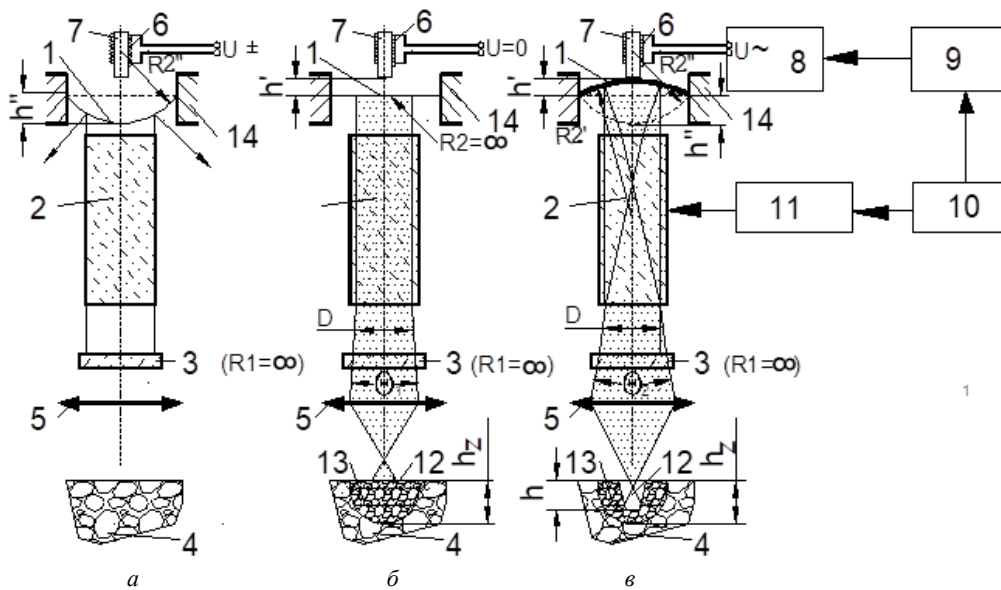


Рис. 5. Алгоритм роботи лазерної установки для прошивання отворів з попереднім одночасним з обробкою отвору нагрівом заготовки або (та) її термообробки: (1 – 100% дзеркало резонатора мембранного типу, 2 – активний елемент (диск або стрижень) YAG:Nd³⁺, 3 – вихідне дзеркало резонатора, 4 – заготовка, 5 – лінза, 6 – електромагнітний привод змінення кривизни дзеркала 1, 7 – упор-сердечник електромагніту 6, 8 – блок живлення електромагніту 6, 9 – блок керування електромагнітом 6, 10 – процесор, 11 – блок живлення лазера, 12 – зона опромінення заготовки, 13 – зона нагріву (ТО) матеріалу заготовки, 14 – корпус дзеркала 1)

неможливістю підсилення світла у відсутності стоячої хвилі в ньому. Без живлення електромагніту 6 дзеркало прийме плоску форму та створить граничну конфігурацію резонатора, в якому можливо створення стоячої хвилі (рис. 5б) тому сформується промінь з кутом розходження θ_1 (рис. 5б), який за мілі секундної дії накачування активного середовища здатен, будучи сконцентрованим лінзою 5 в зону розташування отвору на заготовці 5 до середньої інтенсивності $10^5 \geq I_{pa} \geq 10^4$ Вт/см², прогріти її на глибину h_z , більшу, ніж приріст глибини отвору за 1 імпульс. Чому обрано активний елемент YAG: Nd³⁺? Тому, що в режимі вільної генерації (ВГ) (рис. 6а) його порції енергії мають гіпер імпульсну структуру, тобто без 100% прорізання її на пічки, що знижує інтенсивність останніх I_{ps} нижче потрібної для руйнування металів. За умови обробки металів у підігрітому стані обираються режими опромінення і за першим імпульсом, як найшвидше $\Delta T = \min$ (рис. 6), повинен надходити імпульс руйнівної структури з пічками інтенсивністю $I_p^* \geq 10^7$ Вт/см², для чого потрібний режим керованої генерації через модулювання добротності (МД) резонатора 1–3 штучними перервами в його роботі (рис. 6б). Це здійснюється переключенням струму живлення електромагніту 6 на змінний характер із обраною частотою (рис. 5в) внаслідок чого дзеркало 1 буде періодично змінювати свою форму з опуклого при прогині мембрани на h'' та увігнутого з прогином в іншу сторону h' з радіусом кривизни R_2' , більшим довжини резонатора, причому останні керуються

положенням сердечнику 7 – його переміщенням в якості упору для дзеркала 1. Генерація при цьому можлива при зупинках мембрани у крайніх положеннях форми дзеркала 1, але лише остання конфігурація резонатору 1–3 є стійкою, при чому з більш рівномірним розподілом потужності в попереку променя завдяки нелінійному елементу – дзеркалу 1 з визначеним радіусом кривизни його робочої поверхні R_2' та з більшим кутом розбіжності θ_2 , для рівня якого треба обирати фокусну відстань лінзи 5: $f = d_0/\theta_2$.

Якщо обрана тактика операції передбачає обробку матеріалу в стані після ТО, то період часу між режимом ТО та лазерного руйнування в межах апертури отвору, що обробляється, тобто період ΔT , повинен бути достатньо довгим для завершення перебудови структури матеріалу заготовки, тобто його витримки при температурі, більшій ніж солідус A_{c1} .

3. Подальше покращення якісних та техніко-економічних результатів ЛРО отворів можливо також в разі їх формування у деформованому або термообробленому, але холодному стані заготовки, якщо додатково обмежити відвід теплової енергії із зони опромінення. Для цього необхідно звернути увагу на комплексну характеристику теплових властивостей матеріалу – температуропровідність a , яка визначається теплопровідністю k , теплоємністю c та його щільністю ρ . Вона характеризує швидкість, з якою тепло лишає зону нагрівання, тобто порожнину отвору, що обробляється, тому залежить також від контрасту (градієнту) тем-

ператур у напрямку його руху. Щоб обмежити швидкість охолодження зони опромінення необхідно організувати навколо неї теплову завісу у вигляді пустотилого теплового циліндру з температурою, трохи, але нижчою, ніж температура плавлення матеріалу виробу. Відмінність процедури опромінення із створенням захисного теплового бар'єру від використаних вище в тому, що обидва канали опромінення повинні діяти одночасно, а не в послідовності один за одним, як, наприклад, за схемою рис. 6. Приклад інженерного рішення такої технологічної задачі наведено на рис. 7, причому в ньому максимально обмежена необхідність в кількості оптичних елементів та спрощена процедура налаштування системи в разі зміння умов та вимог до результатів обробки.

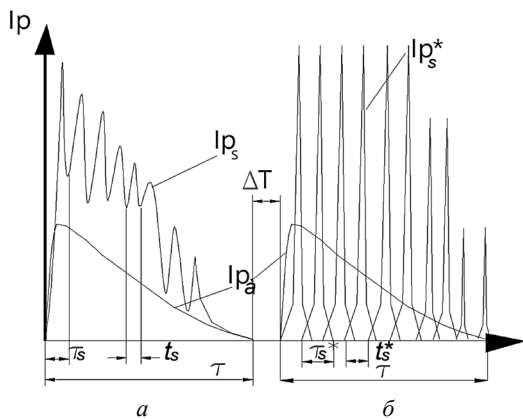


Рис. 6. Часовий характер опромінення заготовки при її обробці з підігрівом або після ТО (I_{pa} – середня інтенсивність променя, I_{ps} – пічкова інтенсивність в режимі ВГ (а), I_{ps}^* – пічкова інтенсивність при МД резонатора (б), τ – тривалість імпульсу, t_s і t_s^* – тривалості пічка відповідно та періоду його надходження в режимі ВГ (а) та t_s^* і t_s^* – теж саме при МД резонатора (б), ΔT – часовий інтервал між режимами ВГ та МД резонатора)

Два режими одночасного опромінення заготовки досягається при поділенні променя на два: центральну частину 1, як найпотужнішу, обмежують розташуванням в резонаторі 8 пасивного модулятора добротності лазера 10 (кристал $LiF_2 : F_2^-$ діаметром D_0). Така конструкція лазера дозволяє при відповідній концентрації променистої енергії отримувати в зоні навколо розташування обробляемого елемента заготовки її поверхню у вигляді кільця із внутрішнім діаметром d_3 , більшим, ніж розмір отвору d_0 , який потрібно обробити, та шириною b_3 (рис. 7а). В цій зоні пустотилого кільця потрібно на глибину отвору, що створюється, одиничним імпульсом периферійної енергією променя, створити теплове джерело з температурою, нижчою ніж температура плавлення матеріалу заготовки $T_{пл}$. Для визначення режиму опромінення можна використати відомі методики аналітичного або експериментального проектування операції нагріву лазерним променем, в тому

числі без руйнування матеріалу [10] та з формуванням порожнини отвору [2]. В результаті проектування операції повинні бути встановленими такі умови виконання запропонованої процедури обробки: діаметр зони опромінення d , імпульсна енергія E_i та її розподіл у попереку променя діаметром D , кут розбіжності променя θ_D , тривалість імпульсу τ , інтенсивність в зонах опромінення: кільцевій, площею $\pi(d_3 + 0,5b_3) \times b_3$, $I_p = (10^4 \div 10^5)$ Вт/см² та $I_p \geq 10^8$ Вт/см² в межах отвору, що обробляється, площею $\pi d^2/4$, кількість імпульсів для формування отвору заданої глибини, або для наскрізного формування отвору в заготовці заданої товщини. Також повинні бути відомі температурні залежності матеріалу заготовки k , c , a та r .

Для проектування оптичної системи, складеної із скляної лінзи та з рідини, яка до того ж повинна бути відсутньою в осьовому отворі розміром D_0 у центральній частині променя, потребується застосування спеціального алгоритму її проектування:

– визначення фокусної відстані лінзи 2, виходячи з діаметру отвору d , кута розбіжності променя θ_D за умови розташування поверхні заготовки в каустиці на початку довжини Релея (над фокальною площиною), в межах якої розмір променя майже незмінний і дорівнює $d = f_1 \theta_D$; $f_1 = d / \theta$, де $\theta \leq \theta_D$, причому обране значення f_1 треба округлити до того найближчого, що мається у наявності, для якого уточняється потрібний кут розбіжності θ ;

– з урахуванням закону розподілу потужності у попереку променя, найчастіше нормального, обирається розмір центральної частини променя діаметром D_0 , в якій зосереджена енергія на рівні половини максимального рівня інтенсивності у ньому $I_{p_{D_0}} = 0,5 I_{p_D}$ ($D_0 = 0,83 D \sqrt{\alpha}$), де α – коефіцієнт зосередження випромінювання);

– при відмінності кута розбіжності центральної частини променя $\theta_{D_0} = (D_0 / D)^2 \theta_D$ від потрібного для формування каустики лінзою f_1 значення θ , між лазером та оптичною системою необхідно розташувати афокальний телескоп Галілея (рис. 7б) для керування розбіжністю променя, наприклад, якщо для активного елемента $\varnothing 6,6$ мм його збільшення обираємо рівним $\Gamma = 3$, то при фокусних відстанях складових лінз $F_1 / F_2 = 1/3$, зможемо шляхом розладу телескопу на відстань Δ керувати кутом розбіжності центральної частини променя з вихідного значення θ_{D_0} до значення θ , для чого величина розладу телескопу визначається із рівняння:

$$\Delta_{1,2} = 0,5 \left(\frac{D_0}{2\theta_{D_0}} + x \right) \pm \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D_0}{2\theta_{D_0}} + x \right)^2 + \left(\frac{F_1^2 \theta}{\Gamma \theta_{D_0}} - F_1^2 \right) \right]^{1/2}$$

Причому за рішення приймається менше з двох значення Δ , причому при від'ємному його значенні першу лінзу потрібно перемищати назустріч променю;

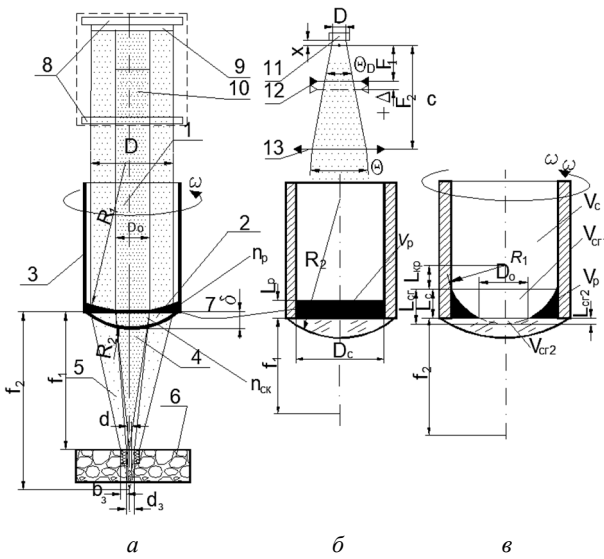


Рис. 7. Лазерна установка для обробки порожнин із захистом зони обробки тепловою завесою. (а – складові установки: 1 – лазерний промінь, 2 – лінза товщиною δ , 3 – стакан, 4 – центральна ділянка променя, 5 – периферійна частина променя, 6 – заготівка, 7 – рідина, 8 – резонатор лазера, 9 – активний елемент, 10 – пасивний затвор) (б – розрахункова схема: f_1 та f_2 – фокусні відстані, відповідно, лінзи 2 (скло – показник заломлення n_{cr}) та об’єктиву з лінзи 2 та з рідини 7 (показник $n_p \approx n_{cr}$), R_1 – радіус кривизни поверхні лінзи 7, R_2 – радіус кривизни сферичної поверхні лінзи 2, D_c – внутрішній діаметр стакану, D_o – внутрішній діаметр від’ємної рідинної лінзи 7, V_p – об’єм рідини, L_p – товщина шару рідини, V_{cr1} , V_{cr2} , L_{cr} , L_c , L_{cr} , $L_{кр}$ – розрахункові елементи рідинної лінзи, ω – кутова швидкість обертання стакану 3), (в – схема телескопу Галілея: 11 – лазер, 12, 13 – лінзи з фокусною відстанню F_1 та F_2 , x – відстань від лазера до телескопу)

– для організації опромінення периферійною частиною променя $D-D_o$ кільцевої зони навколо зони обробки застосовується об’єктив із двох лінз – перша рідинна, яка утворюється із шару рідини 7, яка має показник заломлення $n_p = 1.53$ рівний тому ж із скла, при обертанні стакану 3, заповненого нею до відповідного об’єму V_p з кутовою швидкістю ω , за якою відцентрові сили переміщують рідину в периферійну частину стакану 3, при чому внаслідок змочування поверхні лінзи 2 та стінки стакану 3 утворюється параболоїд обертання, близький за кривизною до кулі у її вершині. Тобто на плоскій площині лінзи 2 формується від’ємна лінза з фокусною відстанню f_2 :

$$f_2 = D_o f_1 / (D_o - d_3).$$

Для формування цим об’єктивом (f_2 та f_1) кільцевої зони діаметром d_3 навколо отвору, що обробляється $d_3 = d + (0.05 \div 0.10)$ мм та шириною b_3 :

$$b_3 = \frac{f_2 - f_1}{2f_2} (D - D_o).$$

– рідина 7 повинна мати при обертанні кривизну передньої поверхні R_1 ($n_{cr} = n_p = n = 1.53$):

$$R_1 = \frac{[\delta(n-1) - nR_2]f_2(n-1)}{n(R_2 - f_2(n-1))},$$

– кривизна передньої поверхні рідинної лінзи створиться при її обертанні з кутовою швидкістю:

$$\omega = (g/R_1)^{1/2}$$

– об’єм рідини в стакані повинен бути обмеженим для утворення лінзи в межах внутрішнього діаметру D_o та стінки стакану D_c :

$$V_p = (V_{cr1} - V_{cr2}),$$

де: $V_{cr2} = 1/3 \times \pi L_{cr2}^2 (3R_1 - L_{cr2})$;

$L_{cr2} = R_1 = L_{кр}$; $L_{кр} = [R_1^2 - (0.5D_c)^2]^{1/2}$ – об’єми сегментів рідини при її обертанні

– товщина шару рідини в стакані в статичному стані:

$$L_p = 0.5\omega^2 \left[\frac{[(0.5D_o)^2 - (0.5D_c)^2]^2}{0.5D_c^2 g} \right]$$

Таким чином, до режимів опромінення додаються умови опромінення та оптичний елемент для їх реалізації з відповідними характеристиками: діаметром $D_l = D_c$ та фокусною відстанню f_2 .

Але для деяких схем обробки (рис. 5, рис. 7) потрібно підтримувати додатковий до режиму обробки часовий режим чередування двох видів лазерного опромінювання ΔT для того, що б реалізувати запропонований режим прецизійної обробки. Так, для схеми, зображеної на рис. 5, перші імпульси в режимі ВГ повинен створити на задану глибину прогріту або змінену структуру матеріалу та через час ΔT , необхідний для цього, і, особливо, в разі ТО, наприклад, гартуванні матеріалу з реалізацією усіх перетворень, необхідно виконати обробку наступним (наступними) імпульсом (рис. 6) в іншому енергетичному та часовому режимі опромінення. Для аналітичних розрахунків недостає таких даних, як швидкість утворення зони впливу у обраному вигляді (нагрів або ТО) з урахуванням температурних залежностей теплофізичних властивостей у часі опромінення. Тому реальними та необхідними для використання здаються можливості методу кінцевих елементів за допомогою пакетів прикладних програм (ППП) Maxwell, COMSOL Multiphysics при використанні модулю “Передача Тепла” [12]. Враховуючи специфічність цього етапу проектування його виконавцю необхідно надати особливості умов опромінення для аналізу термодинаміки теплових процесів. На рис. 8а зображена послідовність етапів опромінення для визначення часового об’єму зони нагрівання (або гартування) (схема 1) одним та кількома імпульсами в мате-

ріалі у вихідному його стані. Друге завдання потрібне для рішення такої ж теплової задачі, але до температури випаровування того ж матеріалу (схема 2) імпульсами мікро секундної тривалості при пічкової інтенсивності до 10^{10-12} Вт/см². Третя фаза розрахунку потребує рішення послідовних задач, об'єднаних в одну (схема 3) чередування умов опромінення: перший перехід (нагрівання) виконується одним імпульсом та після паузи тривалістю ΔT , наступає черга руйнівного діяннн на нагрійтий (або загартований) матеріал пачкою пічків також для одного імпульсу з МД резонатора. Далі, в залежності від співвідношення глибин зони нагрівання та руйнування цікаво застосувати багато імпульсні опромінення як для нагріву, так і для формування отвору тому, що враховуючи над частотні можливості імпульсної генерації активного елемента на гранаті (з додатком Nd^{+3}) багато імпульсна обробка суттєво не збільшить тривалість операції обробки та її ціну.

В схемі на рис. 7 практикується одночасне опромінення зони обробки та створення теплової завіси навколо неї, але часові паузи торкаються технічних проблем утворення в єдиному енергетичному імпульсі різ-

них за тривалістю та інтенсивністю зон променя. Початок імпульсу запускає систему накачування активного елемента (рис. 8б), першим формується периферійний промінь а режимі ВГ на режимах, достатніх для нагрівання матеріалу в кільцевій завісі навколо зони формування отвору (поз. 1 рис. 8б). Центральна частина каустики в резонаторі блокується ПЗ до досягнення в стоячій хвилі резонатора рівня інтенсивності, якою просвітлюється кристал ПЗ тобто через деякий час ΔT , який залежить від його початкової прозорості T_0 : більш прозорі кристали формують скоріше цуг пічків (затримка генерації ≤ 100 мкс), які мають тривалість $\tau \sim 0,2$ мкс та період слідування 100 мкс, але зниження прозорості зменшує кількість пічків у імпульсі та тривалість останніх при збільшенні інтенсивності до 10^{10-12} Вт/см². Для цієї схеми опромінення задачею використання нелінійного програмування є визначення властивостей ПЗ через потрібні часові показники: періоду затримки його просвітлення ΔT , тривалості, періоду слідування та пічкової інтенсивності, тобто, досліджуючи термодинаміку теплових процесів в матеріалі заготовки.

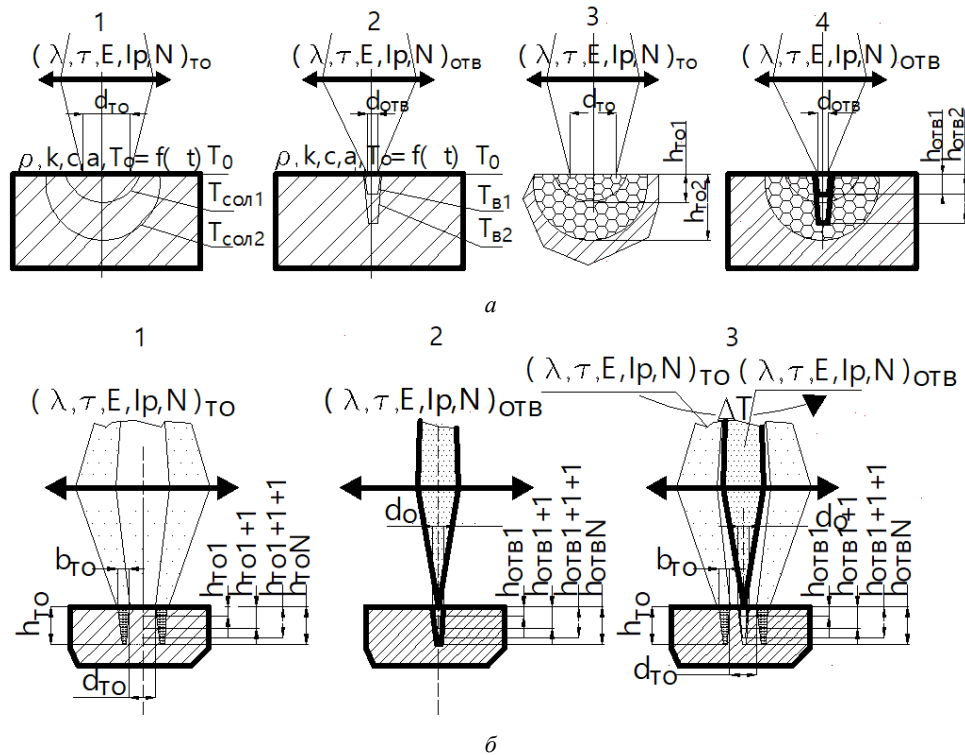


Рис. 8. Черговість схем опромінення в процесі моделювання теплових процедур методами нелінійного програмування. (а: 1 – схема та умови опромінення $(\lambda, \tau, E, I_p, N)_{TO}$ (кількість імпульсів))_{TO} в переході нагрівання зони обробки матеріалу в вихідному стані (ρ, k, c, a , при $T_0 = 20^\circ\text{C}$), 2 – схема та умови опромінення $(\lambda, \tau, E, I_p, N)_{OTV}$ в переході обробки отвору в зони обробки матеріалу в вихідному стані (ρ, k, c, a , при $T_0 = 20^\circ\text{C}$), 3 – схема та умови опромінення $(\lambda, \tau, E, I_p, N)_{TO}$ в переході гартування матеріалу зони обробки в вихідному стані ($\rho, k, c, a, T_0 = 20^\circ\text{C}$), 4 – схема та умови опромінення $(\lambda, \tau, E, I_p, N)_{OTV}$ в переході формування отвору в зони обробки матеріалу в нагрітому або гартованому стані (ρ, k, c, a , при $T_0 = 750^\circ\text{C}$ або $T_0 \leq T_{пл}$); (б: 1 – схема та умови опромінення $(\lambda, \tau, E, I_p, N)_{TO}$ заготовки при формуванні кільцевої теплової завіси навколо зони обробки, 2 – схема та умови опромінення $(\lambda, \tau, E, I_p, N)_{OTV}$ заготовки при формуванні отвору у відсутності завіси навколо зони обробки (матеріал заготовки у вихідному стані ($\rho, k, c, a, T_0 = 20^\circ\text{C}$); 3 – схема та умови опромінення при одночасному формуванні теплової завіси та обробці отвору в зони обробки)

Але останні задачі не є предметом інженерії процесу лазерної технології та будуть досліджені в окремих наукових працях.

Висновки

– порівняння різних способів та засобів підвищення якості розмірної лазерної обробки за умови достатньої продуктивності операцій, які досягалися оптимізацією режиму опромінення, показало, що це не може бути досягнуто лише впливом на властивості лазерного променя, треба аналізувати та керувати інструментом діяння останнього – тепловим джерелом, створеним їм в матеріалі заготовки;

– враховуючи, що лазерний промінь відіграє гнучку логістичну функцію постачання енергії в зону

обробки, треба враховувати участь в ній споживача (матеріалу), його природу, стан та мінливість в залежності від температури;

– розроблені та запропоновані схеми обробки, які залучили відомі корисні властивості металевих матеріалів, як заготовок обробляємих виробів, таких, як теплофізичні характеристики при нагріванні або після пластичної деформації, які можна відновити, якщо потрібно, після виконання операції;

– необхідно продовжити творчі пошуки в цьому напрямку шляхом дослідження кінетики теплових процесів тому, що ряд матеріалів мають протилежні напрямки змінення своїх властивостей внаслідок нагрівання і є цікавість у використанні цих їх особливостей з метою подальшого вдосконалення лазерної прецизійної обробки.

References

- [1] J. Steffen, "Prozessoptimierung bei materialabtragenden Bearbeitungsproblemen mit Laserstrahlung", *Feinwerktechn. und Messtechnik*, vol. 87, no. 7, pp. 309–320, 1979.
- [2] V.P. Kotlyarov, S.G. Shklyar, "Systematization of technological ambushes of precision laser processing", *"Mechanics and Advanced Technologies"* no. 2(86), pp. 61–76, 2019. DOI: 10.20535/2521-1943.2019.86.163208
- [3] T.T. Basiyev *et al.*, "Laser piercing of superdeep micron holes in various materials with programmable control of laser generation parameters", *Kvantovaya elektronika*, vol. 37, no. 1, pp. 99–102, 2007. DOI: 10.1070/QE2007v037n01ABEH013310
- [4] Optics and photonics – Lasers and laser-related equipment, Vocabulary and symbols, ISO 11145: 2016, IDT.
- [5] V.P. Kotlyarov and Ya.M. Gnilyckiy, "Method of laser processing of layered dielectrics", UA Patent Utility Model 67157 Oct. 02., 2012.
- [6] R. Holtz "New precision applications with pulsed Nd:YAG laser", *reclamnyy prospect LASAG A.G. SWATCH Group SA*, 2010.
- [7] V.P. Kotlyarov and O.O. Spas'ka, "Method of laser processing of holes", UA Patent Utility Model 103189, Dec. 10, 02., 2015.
- [8] V.P. Kotlyarov and O.V. Gladchenko, "Device for laser processing", UA Patent Utility Model 99407, Jun. 10, 2015.
- [9] V.P. Kotlyarov and M. Misagi "Device for laser processing of holes in metal products", UA Patent Utility Model, 42519, Jul. 10, 2009.
- [10] L.F. Golovko, S.O. Luk'yanenko, I.Yu. Mihaylova and V.A. Tret'yak, "Computer modeling in laser technologies", *Kiev, "Text"*, 2015.
- [11] V.P. Kotlyarov and O.M. Kiyaschenko, "Technological installation for trepanation of holes with a laser beam", UA Patent Utility Model, 119174, March. 24.2017
- [12] COMSOL Multiphysics, COMSOL Multiphysics Modeling Software, 15.05.2018. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>

Engineering of heat sources in laser precision machining

V.P. Kotlyarov¹

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine

Abstract. Requirement towards the enhancement of the results of technological operations of laser processing, their transformation into precise technological operations is solved, in general, by the choice of optimal technological schemes of laser processing and characteristics of a tool that is formed from laser beam characteristics. The main goal of these attempts is to minimize portions of energy that destroys and removes the material from the cavity of element being formed utilizing ultra-short pulses of electro-magnetic energy with high intensity that can bring balance to the instability of technological process, manage its outcome and maintain the quality of processing. On the other hand, it leads to a decrease in the efficiency of technological operations of laser processing. For example, linear speed of laser cutting of stent with nanosecond pulses are used is within the range of 25 to 30 millimeters per minute, whereas in the case of microsecond pulses - the processing speed can reach up to 250 mm/min and slight striation of side surface of the cutting kerf could be eliminated by means of post processing. Since the process of material destruction at laser beam processing is of a thermal nature in terms of heat dissipation and its propagation into the body of the work piece (especially the metal one), it is possible to control and modify the absorption of radiation by the surface of the work piece, the spatial shape of the heat source and thermal and physical properties of the work piece. This paper discusses perspective solutions for the successful engineering of laser beam irradiation process.

Keywords: laser beam, laser processing, laser beam forming, technological operation, processing outcome, technological equipment, modernization of technological operation