

УДК 621.375.826:621

DOI: 10.20535/1810-0546.2017.1.93597

В.П. Котляров*, О.М. Киященко
КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ В УМОВАХ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Background. The economic decline of Ukraine is mainly caused by the decrease of industry part with the high level of value-added in the wares in GDP. The ineffective use of modern equipment in modern technologies is related to the decrease of competence of engineering skilled workers and all-round violation of technological discipline of pre-production. Besides, most technological operations are executed on principle of "job shop" by small LTD or other with low production culture.

Objective. Creation of the simplified methodology of technological preparation of the most widespread laser treatment operations that does not require the special multicriterion researches.

Methods. The essence of the worked out methodology consists in the implementation of procedure in two stages: on the first one requirements to the object are covered, that can be taken into account as a result of the simplified decisions of thermal tasks of heating and destruction of material by a laser ray, are taken into account. The second stage of planning envisages implementation of other requirements to the results of technological operation due to modernization of treatment scheme and use of the created engineering facilities.

Results. For treatment of hardware (leaks, cups, scratch marks, collars, engraving and contour undercut) the simplified analytical decision of heat-conducting equalization that is adequate during the temporal and power stabilizing of procedure of irradiation is used. The contour undercut of wares of non-metals (wood, plastics) is designed on the worked out scheme with adaptive organization of technological operation. Implementation of this stage of planning envisages the use of the special backer-ups of operation. The observance of requirements to the indexes of quality of operations is realized on the second stage by perfection of irradiation procedure, with the use of lenses of special construction that promote its stability.

Conclusions. The executed developments allowed achieving the goals – operative technological providing of laser treatment operations – using the analytical design of treatment processes and additional perfection of operations by the use of the special engineering facilities.

Keywords: technology; laser; technological operation; engineering facilities; design of process; adaptive form of organization.

Вступ

Традиційний алгоритм впровадження операцій лазерної обробки, як і операцій іншого виду, включає етап їх технологічної підготовки для забезпечення технологічним регламентом і оснащенням, що базується на аналітичному або експериментальному дослідженні процесів, відповідальних за досягнення технологічних результатів. За таким принципом нами було виконано промислове застосування лазерної обробки (у різних видах) на підприємствах СРСР та України та за їх межами. Останнім часом технологічні операції лазерної обробки виконуються найчастіше на більш сучасному лазерному технологічному обладнанні (ЛТО) зарубіжного виробництва від Trumpf, Rofin Sinar (ФРН); Bystronic Laser AG, LASAG AG (Швейцарія) та з Японії (Mitsubishi). Загальною особливістю та складністю застосування лазерної

технології як у державному, так і в приватному секторі є відсутність систематизованих знань, умінь і навичок у режимному та матеріальному оснащенні операцій та за відсутності інженерного супроводження технологічної операції. Тому деякі з користувачів при виборі ЛТО для рішення конкретного технологічного завдання замовляють у виготівника режимне забезпечення замовленої операції разом із прикладом належного результату її виконання. Також зазвичай додаються світлини прикладів обробки з порушенням рекомендованого режиму у двох напрямках від оптимального та рекомендації для повернення до кращої якості. Такий метод технологічного забезпечення операції не може вважатися достатнім для керування процесом лазерної обробки, особливо у випадках змінення виду технологічної операції, техніко-економічних її показників або властивостей заготовки.

*corresponding autor: kotlyarovv@ukr.net

У розробленні методик технологічного забезпечення операцій лазерної розмірної обробки (отворів, лунок, пазів, різів, гравірування) в різні часи брали участь фізики (П. Уляков [1], М. Лібенсон [2], Дж. Стефен [3], Г. Херзігер [4]), оптики (В. Вейко [5], Г. Суслов [6]) і технологи (Г. Тархов [7], Є. Вакс [8], Н. Сагоші [9], В. Суминов [10]). За винятком методики з [3], усі інші розробки дають змогу лише *прогнозувати* розмірні результати виконання операції (діаметр і глибину отвору, ширину пазу, різу, товщину контурної лінії) при вибраних рівнях керованих параметрів процесу обробки. Однак дієвий метод проектування режимів за Дж. Стефеном вимагає технічного пристосування ЛТО для реалізації особливих (специфічних) умов опромінення, в т.ч. часового режиму роботи лазера.

Ця робота присвячена створенню спрощеної методики проектування багатокритеріальних операцій без втрати її роздільної здатності за рахунок використання реальних можливостей технологічного обладнання та за його модернізації і забезпечення операції відповідним оснащенням.

Постановка задачі

1. Розробити алгоритм визначення режиму лазерної розмірної обробки на базі приблизного розв'язку рівняння теплопровідності для таких операцій:

- *обробка наскрізних* отворів діаметром $d \leq 0,3$ мм у металевих заготовках завтовшки $0,1-3,0$ мм;
- *вирізання наскрізних* отворів діаметром $d > 0,3$ мм у металевих заготовках завтовшки $0,1-3,0$ мм;
- формування *системи лунок* (ненаскрізних отворів) діаметром $d = 0,05-0,30$ мм глибиною $z = 0,1-0,5$ мм у металевих заготовках;
- формування *системи наскрізних отворів* діаметром $d = 0,05-0,30$ мм у металевих заготовках завтовшки $\delta \leq 3,0$ мм;
- *контурного розкрякування* листових заготовок із деревини та пластмас завтовшки до 20 мм.

2. Створити систему технологічного оснащення операцій обробки отворів, вирізання виробів із листових заготовок і поверхневих видів обробки (формування регулярного рельєфу та поверхневого гравірування).

3. Оцінити якість проектування за створеними алгоритмами експериментальних досліджень.

Результати розробок

Операції розмірної (прецизійної) лазерної обробки. Ці види операцій зазвичай виконуються при імпульсній (порційній) подачі енергії в зону обробки для всіх можливих схем технологічних операцій.

А. Для *формування отворів* найефективнішою є технологічна схема з випаровуванням матеріалу заготовки в межах перерізу отвору. Залежно від можливостей технологічного лазера та заданого рівня якості обробки опромінення виконують імпульсами вільної генерації [2, 5] тривалістю $\tau \in 0,1-0,5$ мс з енергією E до 5 Дж. Однак імпульсами такої тривалості неможливо створити необхідний рівень інтенсивності I_{pa} у межах обумовлених розмірів попереку отвору, якщо їх часова структура не складається з окремих пічків відповідної тривалості $\tau_s \ll \tau_a$ та інтенсивності $I_{ps} \gg I_{pa}$. Імпульси вільної генерації (ВГ) лазерів на базі активних середовищ з аморфними матрицями (скло: Nd^{+3} , кварц: Yb^{+3}) відповідають таким вимогам, але внаслідок використання стоячої хвилі для підсилення випромінювання в резонаторі їх часова та енергетична структура набуває хаотичності. В таких умовах опромінення неможливо описати та врахувати реальний темп надходження енергії випромінювання в зону обробки, тому запропонований алгоритм розрахунку режимів опромінення, який базується на приблизному розв'язанні рівняння теплопровідності, вимагає регулярного постачання енергії в наборі стабільних за тривалістю τ_s , періодом t_s та інтенсивністю I_{ps} пічків (рис. 1). Такий режим генерації досягається або частотною модуляцією енергії накачування активного середовища (волоконні лазери), або періодичним змінням добротності резонатора газових, твердотільних стрижневих чи дискових лазерів.

Початковими даними для проектування є: матеріал заготовки; діаметр отвору d ; глибина глухого отвору (лунки) або товщина заготовки h (δ); характеристики технологічного лазера: - довжина хвилі випромінювання; - діапазони варіювання характеристиками лазерного променя: імпульсною енергією ($E_{min}-E_{max}$), тривалістю імпульсу ($\tau_{min}-\tau_{max}$), кутом розбіжності ($\theta_{vmin}-\theta_{vmax}$) та діаметром променя ($D_{min}-D_{max}$);

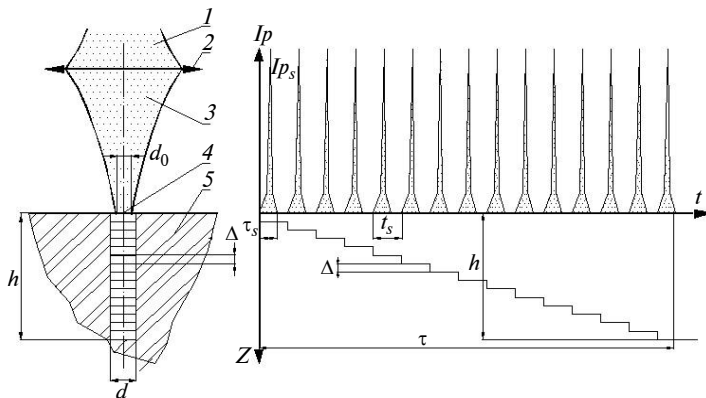


Рис. 1. Схема опромінення та формоутворення отвору імпульсом випромінювання з регулярною пічковою структурою: 1 – лазерний промінь, 2 – лінза, 3 – каустика променя, перетвореного лінзою, 4 – зона опромінення, 5 – заготівка

параметри оптичної системи:

- телескоп: збільшення Γ , фокусні відстані його першої (F_1) та другої (F_2) лінз, діапазон змінення відстані $x_{\min} - x_{\max}$ від випромінювача до переднього фокуса першої лінзи телескопа;

- фокусуєча лінза (об'єктив): набір фокусних відстаней F_i або діапазон плавного чи дискретного їх змінення $F_{\min} - F_{\max}$.

Порядок розрахунку.

1. Вибирається рівень густини потужності W_p теплового джерела в тілі заготівки, необхідний для реалізації вибраного механізму руйнування її матеріалу: для переважаючого випару матеріалу порожнини отвору уздовж його глибини рівень $W_p = AI_{ps}$ повинен перевищувати значення 10^7 Вт/см² (A – коефіцієнт поглинання енергії лазерного променя поверхнею заготівки).

2. Розрахунковий рівень тривалості пічка випромінювання τ_{sp} визначається з умови обмеження бічного тепловідведення для зменшення кількості розплаву в продуктах ерозії: $\tau_{sp} = 4,10^3 \times d^2/a$ (a – коефіцієнт температуропровідності матеріалу заготівки), й уточнюється із набору можливих для технологічного лазера значень до τ_{sd} .

3. Товщина шару матеріалу заготівки, що видаляється одним пічком:

$$\Delta = W_{ps} \times \tau_{sd} / (L_B \rho),$$

де L_B – питома теплота випару матеріалу заготівки, ρ – його щільність.

4. Період надходження імпульсів t_s вибирається з умови забезпечення винесення продуктів ерозії від кожного пічка з порожнини отвору поточної глибини Z_i : ($t_s - \tau_{sd} > Z_i/V$), та обмеження охолодження матеріалу в поверхні опромінення до температури кристалізації матеріалу заготівки: ($t_s - \tau_{sd} < 0,05d^2/a$), тобто: $Z_i/V < t_s - \tau_{sd} < 0,05d^2/a$. Тоді:

$$Z_i/V + \tau_{sd} < t_s < 0,05d^2/a + \tau_{sd},$$

де V – швидкість розльоту частинок ерозійного факела, яка покладається рівною 10^4 м/с; Z_i – поточна глибина отвору, покладається рівною повній глибині отвору ($Z_i = h$) або товщині заготівки ($Z_i = \delta$).

5. Частота надходження імпульсів $f = 1/t_s$ уточнюється з ряду значень, що реалізуються на цій установці, як $f_d \geq f$.

6. Кількість імпульсів, необхідних для формування отвору заданої глибини h або в заготівці заданої товщини δ : $n = h(\delta)/\Delta$.

7. Енергія поодинокого мікроімпульсу (пічка): $E_s = W_{ps} \tau_{sd} \pi d^2 / (4A)$.

8. Енергія цугу імпульсів: $E = nE_s = n \times W_{ps} \times \tau_{sd} \pi d^2 / (4A) = \pi d^2 h L_B \rho / (4A)$.

9. Діаметр променя на поверхні заготівки: $d_0 = d$.

10. Кут розбіжності променя перед лінзою θ : $\theta = d_0/F_{\min}$, де F_{\min} – фокусна відстань лінзи, яку при використанні тактики слідкування вибраним попереком каустики (d_0) за положенням дна отвору, що обробляється, необхідно вибирати з глибиною її різкості більшою, ніж глибина лунки h або товщина заготівки δ , тобто: $F_{\min} \geq D_L \left[\frac{\pi \delta}{11,12\lambda} \right]$, де D_L – діаметр променя на головній площині лінзи.

11. Для узгодження кута розбіжності променя після випромінювача θ_B з кутом розбіжності променя перед лінзою θ (п. 10), який необхідний для формування каустики заданої форми після перетворення променя лінзою з фокусною відстанню F_{\min} , визначається величина розладу телескопа Галілея [11]:

$$\Delta_{1,2} = 0,5 \left(\frac{D_L}{2\theta_B} + x \right) \pm$$

$$\pm \left[\frac{1}{4} \left(\frac{D_{\text{л}}}{2\theta_{\text{в}}} + x \right)^2 + \left(\frac{F_1^2 \Gamma \theta}{\theta_{\text{в}}} - F_1^2 \right) \right]^{1/2}.$$

Технологічне оснащення операції. По-перше, для реалізації технологічної схеми (див. рис. 1) необхідний пристрій для створення регулярного цугу пічків з керованими часовими, частотними й енергетичними характеристиками від технологічного лазера, який зазвичай має режим роботи ВГ або безперервний. Використання серійних приладів, принципи дії яких базуються на дифракційному відхиленні променя від осі резонатора, на повороті площини поляризації променя навколо останньої тощо, не ефективно впливає на енергетичні характеристики випромінювання тому, що перші взаємодіють із випромінюванням основної моди (однією з можливих довжин хвиль). Це в 3-4 рази знижує потужність випромінювання після модуляції. Електрооптичні модулятори потребують розміщення декількох оптичних елементів у резонаторі, які обмежують апертуру та потужність променя, а також викривляють його хвильовий фронт. Більш придатні модулятори випромінювання, які працюють шляхом періодичного змінення добротності резонатора за рахунок порушення резонансних умов формування стоячої хвилі в резонаторі, наприклад періодичним його роз'юстуванням [12] (рис. 2, а) або зміненням конфігурації [13] (рис. 2, б).

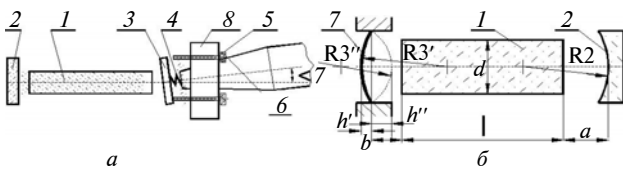


Рис. 2. Схеми модуляторів добротності резонатора із плоских (а) та сферичних (б) дзеркал: 1 – активний елемент, 2 – вихідне дзеркало резонатора, 3 – 100 % дзеркало, 4 – пружний елемент, 5 – юстирувальні гвинти дзеркала резонатора, 6 – ультразвукова головка, 7 – 100 % дзеркало – мембрана, 8 – механізм юстирування дзеркала резонатора

Загальною особливістю таких модуляторів є те, що 100 %-ній модуляції піддаються промені зі структурами TEM_{00} і TEM_{mn} . У першій схемі (а) це досягається внаслідок періодичного впливу на поріг генерації квантрона 1–2–3 змінням нахилу 100 % дзеркала 3 його резонатора 2–3 за допомогою ультразвукової головки 6. 100 % дзеркало 3 резонатора 2–3 у другій схемі (б) виготовлене у вигляді пружної

мембрани з приводом її вигинання. Під час змінення кривизни цього дзеркала з достатньою швидкістю формування стоячої хвилі в резонаторі не можливе, генерація утворюється при статичних станах дзеркала (при його крайніх положеннях).

Б. Для вирізання отворів (діаметром більше 0,3 мм, у т.ч. некруглої форми) застосовують технологічну схему трепанації (рис. 3, а), за якою контур отвору формується суперпозицією наскрізних отворів діаметром d , що утворюються в заготівці діянням пічків випромінювання при їх поступовому переміщенні з кроком $S < d$ (рис. 3, б). Якщо глибина формувальних отворів Z не перевищує товщину заготовки δ , то *суперпозиція ненаскрізних отворів (лунок) утворює канавку, паз, риску або контурну лінію малюнку, літери*, тобто елементів гравірування (рис. 3, в). Для вирізання отворів у більш товстих заготівках (рис. 3, г) необхідно застосовувати багатоімпульсний режим опромінення з таким сполученням частоти надходження імпульсів (пічків) f та кроком їх зміщення S_p , щоб мінімальна глибина їх суперпозиції досягла нижньої сторони заготовки, тобто $Z_{\text{min}} \geq h$. Враховуючи, що загальний результат діяння лазерного променя на заготівку складається із розмірів і форми одиничних елементів (отворів, лунок) та параметрів їх взаємного розміщення, до порядку та складу режимного забезпечення операцій контурної обробки необхідно додати нормативні дані взаємодії окремих елементів.

Якщо рівень імпульсної енергії достатній для прошивки стінки заготовки одним імпульсом (пічком) (рис. 3, а) або для формування риски глибиною Z (рис. 3, в), то шорсткість стінки отвору, що вирізається, або сформованої риски визначається коефіцієнтом перекриття сусідніх отворів $k_n = S/d_0$ ($S = Vf$ – крок між сусідніми отворами в одній площині), що для встановленого значення f і заданого рівня шорсткості поверхні $[R_z]$ обмежує лінійну швидкість різання V величиною

$$V \leq f d_0 \left[1 - \left(1 - \frac{[R_z]}{d_0} \right)^2 \right]^{1/2}.$$

Якщо стінка заготовки товщиною δ наскрізно прошивається подачею n імпульсів (пічків) (рис. 3, г), тобто $\delta = n\Delta$ (Δ – приріст глибини лунки (риски) від дії одного імпульсу (пічка)), то у зв'язку з необхідністю зменшення величини

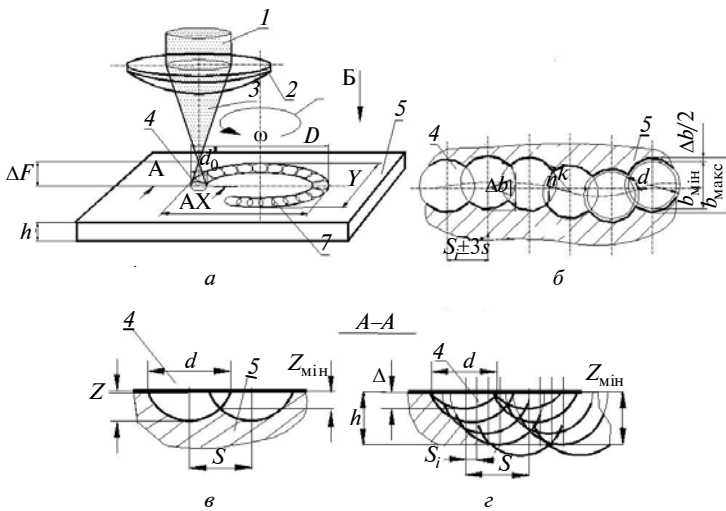


Рис. 3. Схеми контурної лазерної розмірної обробки (вирізання отворів та гравірування): *a* – схема трепанації, *б* – фрагмент різі (контурної лінії), *в* – одноімпульсна обробка, *г* – багатоімпульсна обробка; 1 – промінь, 2 – лінза, 3 – каустика променя після лінзи, 4 – зона опромінення, 5 – заготівка, 6 – напрям відносного руху променя або заготівки, 7 – контурна лінія (різ, канавка)

ни кроку зсуву променя від лунки до лунки до величини $S_i = S/n$ вимушено зменшується швидкість обходу контуру при незмінній частоті надходження імпульсів: $V_i = S_i f$. Тоді зі скороченням швидкості обробки створюється умова зменшення систематичної похибки ширини різі (канавки) до величини Δb :

$$\Delta b = b \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{V}{nfb} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}.$$

Контурне розмірне розкрювання листових заготовок із деревини та пластмас завтовшки до 20 мм. Розрізання листових матеріалів лазерним променем засноване на їх руйнуванні (у режимі плавлення або випару) тепловим потоком, який наводиться в зоні дії променя. Економічним є метод розрізання в режимі плавлення, оскільки для всіх матеріалів питома теплота випару істотно (на три порядки) перевищує питому теплоту плавлення. Для такого режиму опромінення потрібна додаткова силова дія на розплавлений матеріал у зоні обробки для його видалення із зони різі і формування розмірного ефекту. Звичайну дію лазерного променя супроводжують поданням компактного струменя стислого газу тиском до 2,0 МПа, співвісно або під кутом до осі променя. Оскільки матеріал перебуває за високої температури,

його хімічна активність підвищується, і спостерігаються процеси насичення шарів оброблюваного матеріалу в стінках різі складовими технологічного газу з утворенням оксидів, нітридів і карбідів. Унаслідок цього склад суміші газу або його тип повинні вибиратися з урахуванням властивостей оброблюваного матеріалу. Проте для будь-якого типу газу важливою є форма і розміри газового струменя в межах товщини заготівки, що визначається типом сопла витікання, діаметром його вихідного отвору d_c і положенням відносно поверхні заготівки z_c . Таким чином, набір режимів обробки повинен включати перелічені параметри, що визначають умови обдування заготівки, тобто d_c – діаметр отвору сопла і z_c – відстань від його торця до поверхні заготівлі разом із p – тиском газу в струмені. Тобто *при безперервному режимі опромінення* необхідно

встановити наведений нижче набір керованих параметрів процесу.

Порядок розрахунку.

Потужність лазерного променя:

- для тонких заготовок ($\delta < b/4$):

$$P = \left[\delta - 0,35 \left(\frac{ad_0}{V} \right)^{1/2} \right] \frac{\pi d_0 \rho L_u V}{4A},$$

- для товстих заготовок ($\delta > b/4$):

$$P = 1,5\delta\rho L_u a / A.$$

Швидкість подачі при лазерному розрізанні:

$$V = \frac{100d_0 a}{\delta^2}.$$

Діаметр променя на поверхні заготівки:

- для тонких заготовок ($\delta < b/4$):

$$d_0 = \frac{V\rho L_u \delta}{W_p};$$

- для заготовок товщиною ($\delta > b/4$):

$$d_0 = \frac{3a}{V},$$

де W_p – густина потужності теплового потоку, створеного в заготівці внаслідок її опромінення променем з інтенсивністю $I_p = W_p/A$: за безперервного режиму опромінення $I_p \leq 10^6$ Вт/см².

Фокусна відстань лінзи (її розрахункове значення):

$$F_p = d_0 / \theta.$$

Розрахункове значення фокусної відстані F_p є підставою для вибору із набору лінз, що досяжні, дійсного його значення F_d за виконання умови

$$F_d \leq F_p.$$

Якщо вибрано лінзу з меншою фокусною відстанню, то для отримання заданого розміру променя на поверхні заготовки останню необхідно змістити з площини перетяжки в область більших розмірів каустики, бажано в бік лінзи, на величину

$$\Delta F = \frac{F_d}{D_l} (d_0 - F_d \theta),$$

де D_l – діаметр променя на рівні головної площини лінзи.

Діаметр сопла d_c вибирається більшим, ніж розмір променя d_0 на рівні торця сопла.

Поздовжній профіль сопла вибирається залежно від можливостей його виготовлення в умовах виробництва: сопло для дозвукової швидкості витікання струменя газу може мати циліндричну або конічну форму; для надзвукових швидкостей профіль ускладнюється – Лавала або Вентурі. Торіць сопла розміщується на відстані z_c над поверхнею заготовки, її величина не перевищує 0,5–1,0 мм, щоб забезпечити високу енергію струменя в межах товщини заготовки.

Тип технологічного газу вибирають залежно від матеріалу заготовки: для заготовок із чорних металів (сталі, чавуни) використовують чистий кисень або повітря; кольорові та легкі метали успішно і якісно розрізаються з подачею неактивних газів (CO_2 , Ar, N_2); неметали – ефективно розрізаються з подачею кисню або пального газу, а якісно – у супроводженні неактивного газу або суміші. Тиск газу p вибирається зазвичай у межах 0,02–2,0 МПа і залежить від товщини заготовки, тому що зі збільшенням глибини різку зменшуються рівні параметрів струменя та ускладнюється очищення порожнини різку.

Експрес-метод визначення режимів газолазерного розрізання листових заготовок. При виконанні робіт з лазерної обробки матеріалів в умовах ТОВ часто використовується принцип

надання послуг у вигляді “job shop”, коли виробу виготовляються із давальницької сировини, тобто продається робота. Така форма організації виробництва є, за суттю, дрібносерійною або індивідуальною, що характеризується різноманітністю замовлень, у т.ч. за параметрами заготовок (матеріалу, стану, товщини тощо). В цих умовах витрати на технологічне забезпечення разового замовлення можуть досягти вартості самої роботи, тому за часті зміни технологічних завдань рекомендується використати експрес-метод вибору умов контурного вирізання [14], заснований на використанні установки, зображеної на рис. 4.

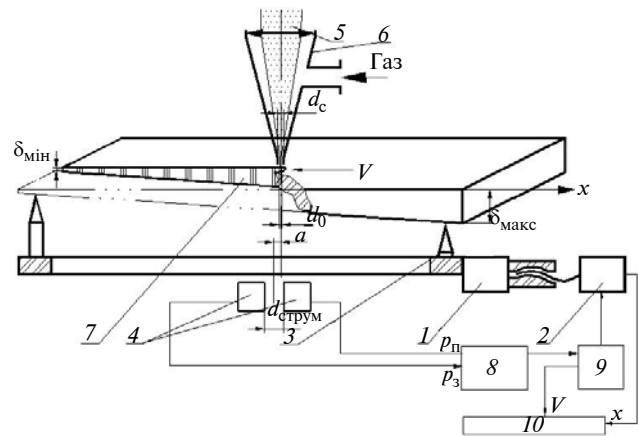


Рис. 4. Схема стану для експрес-методу визначення режимів розрізання заготовок різної товщини лазерним променем: 1 – стій ЛТУ, 2 – привід столу, 3 – наставні штирі, 4 – датчики тиску, 5 – промінь, 6 – різак, 7 – заготовка у вигляді клина, 8 – аналізатор тиску в датчиках 4, 9 – процесор, 10 – монітор; $P = \text{const}$, $d_0 = \text{const}$, $V = \text{vary}$

За цим методом клиноподібну заготовку 7 із матеріалу виробу, у якій мінімальна й максимальна товщини вибрані з набору товщин заготовок, що будуть розрізатися, розміщують на столі 3 ЛТО клином уздовж напрямку подачі V . Нерухомо щодо оптичної системи 6 під заготовкою розміщують два датчики тиску 4 на відстані $b = d_{\text{струм}}$ один від одного зі зсувом центра проти напрямку різання на величину $a = d_0/2$ щодо осі променя. Установка працює в адаптивному режимі: вибирається рівень потужності променя P , необхідний для розрізування заготовки найбільшої товщини δ_{max} , а швидкість подачі V змінюється процесором 9 залежно від реальної товщини заготовки δ_x для того, щоб забезпечити витікання робочого струменя газу в зазор $d_{\text{струм}}$ між датчиками 4 створенням на кожному з них одна-

кового тиску. Зіставляючи послідовність миттєвих значень швидкості різання V із переміщенням X від початку різання, можна встановити залежність $V = f(\delta_x)$ за відомої клиноподібності заготовки $k = (\delta_{\max} - \delta_{\min})/l$ (l – довжина заготовки в напрямку клину): $\delta_x = \delta_{\min} + kX$.

На рис. 5 показано такі залежності, які отримано при розрізанні заготовки з дубу мореного довжиною 450 мм із клиноподібністю $k = (5,0 - 0,5)/450 = 10$ на лазерній технологічній установці (ЛТУ) з лазером "Іскар" для потужності променя $P = 200, 250$ і 500 Вт. Таким чином, увесь діапазон товщини матеріалів, що будуть розрізатися (у прикладі $d \in 0,5 - 5,0$ мм), нормується за один перехід розрізання модельного зразка. Якщо в ЛТУ не передбачене плавне керування рівнем швидкості подачі стола V , запропонована методика може бути використана для побудови залежності $P = f(\delta_x)$ для постійної величини подачі. У цьому випадку операція виконується на швидкості, яка необхідна для розрізування клиноподібної заготовки найменшої товщини променем вибраної потужності; процесор ρ керує режимом роботи блока живлення лазера, плавно збільшуючи рівень вихідної потужності променя в міру зростання товщини заготовки для забезпечення оптимальної течії операції різання, що визначається однаковим рівнем тиску струменю на датчиках 4.

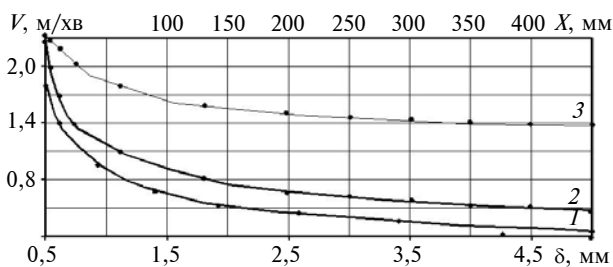


Рис. 5. Технологічні параметри операції розрізання заготовки із дубу мореного: 1 – 200 Вт; 2 – 250 Вт; 3 – 500 Вт; $d_0 = 0,35$ мм, $p = 0,25$ МПа

Спеціальне технологічне оснащення. Крім режимного забезпечення, операції лазерної обробки потребують спеціального технологічного оснащення, особливо в умовах дефіциту витратних матеріалів і комплектуючих елементів, необхідних для їх реалізації. З урахуванням обставин застосування лазерної обробки технологічне оснащення має бути універсальним для задоволення вимог до організації операцій різного призначення.

А. При лазерній обробці *прецизійних елементів виробів* (отворів, лунок, рисок, пазів) якість результатів операцій визначається оптимальністю технологічного режиму їх формування. Хоча пічковий режим опромінення імпульсами мікро- та наносекундної тривалості забезпечує випарний механізм руйнування матеріалу з мінімальним розсіюванням тепла через стінки оброблювального елемента, можливе його додаткове обмеження через створення теплової завіси навколо зони опромінення. Це реалізується одночасним формуванням теплового джерела в зоні опромінення і теплової завіси навколо неї з температурою, меншою $T_{пл}$ матеріалу заготовки. Як видно зі схеми об'єктива для обробки лунки (отвору) [15], лазерний промінь I діаметром D (рис. 6) перетворюється лінзою 2, що є дном склянки 3 і має фокусну відстань F_1 . У склянку заливається рідина 7, що має показник заломлення n_p , рівний показнику матеріалу лінзи (наприклад, для скла К8 з $n_c = 1,53$ такою рідиною може бути гліцерин з $n_r = 1,54$ або кремнійорганічні з'єднання $n_k = 1,53$), причому її об'єм V_p необхідно обмежити величиною, за якої в склянці, що обертається з кутовою швидкістю ω , утворюється лінза з вільною поверхнею у вигляді параболоїда обертання з розривом у центрі діаметром D_0 . Таким чином, центральна частина променя, в якій інтенсивність випромінювання максимальна, перетворюється центром лінзи 2 і використовується для розмірної обробки лунки, а енергія в його периферичній частині концентрується складеною лінзою в кільце діаметром d_3 і шириною b_3 навколо лунки з меншою інтенсивністю в кільцевій зоні опромінення, достатньою для створення теплової завіси без руйнування матеріалу заготовки. Це дасть змогу максимально використати енергію центральної частини променя, зменшуючи її втрати на теплопровідність із зони опромінення. Рідка компонента об'єктива дає змогу оперативного пристосовуватися для змінених умов обробки.

Б. При *поверхневих видах лазерної обробки* (гравірування, зміцнення, створення регулярного рельєфу) на якість виготовлених лазерним променем виробів впливає стабільність процесу руйнування та видалення матеріалу заготовки із зони опромінення. З одного боку, необхідна стабільність вибраних рівнів технологічних параметрів інструмента гарантується станом лазера, але суттєво впливають на ре-

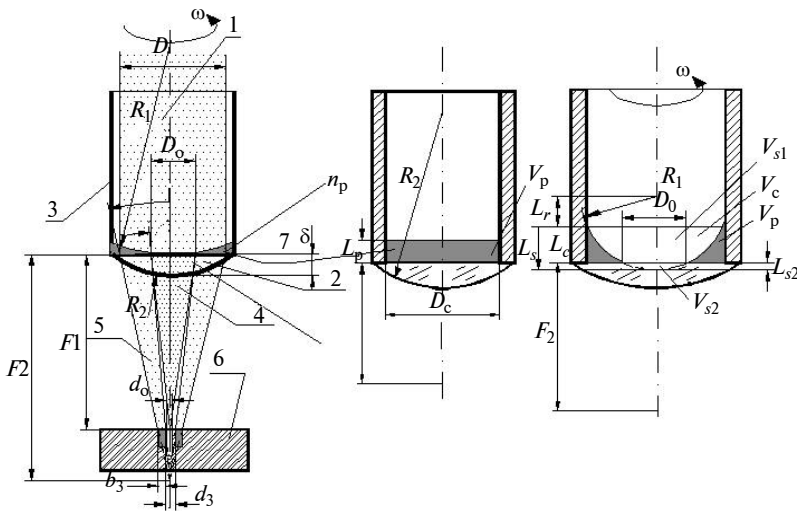


Рис. 6. Об'єктив для обробки отворів (лунок) у заготовках із теплопровідних матеріалів: 1 – промінь, 2 – лінза, 3 – стакан, 4 – каустика центральної ділянки променя, 5 – каустики периферійної частини променя, 6 – заготовка, 7 – рідина

зультати обробки також умови опромінення та властивості заготовки, які забезпечують формування теплового джерела при лазерному опроміненні. Останнє має особливу вагу в разі нерегулярності її поверхні та за низького рівня інтенсивності в технологічній операції. Відомі методи підвищення поглинальної здатності поверхні заготовки не гарантують стабільного рівня перетворення променистої енергії в тепло.

Пропонуються методика та пристрій для опромінення заготовки з підтриманням кількості енергії (потужності) випромінювання, яку поглинає заготовка, *на постійному рівні*, визначеному технологічним регламентом. Для реалізації цієї методики створюються умови оперативного визначення рівня реальної поглинальної здатності поверхні безпосередньо в зоні опромінення та вздовж напрямку відносного пересування променя завдяки активному контролю рівня відбитої від поверхні енергії (потужності). В разі недопустимих коливань коефіцієнта відбиття $R = E_{\text{відб}} / E$ унаслідок зміни оптичних властивостей поверхні заготовки або покриття на ньому питома енергія в зоні термічного впливу заготовки повинна підтримуватися на заданому рівні змінням умов опромінення. Найбільший вплив мають енергетичні параметри операції (E або P) та умови опромінення (d_0 , t або V). Керування енергетичними параметрами зміною умов роботи випромінювача на ЛТУ з ЧПК (ПК) потребує вільного каналу керування та виконавчих елек-

тронних ключів у системі наочучування активного середовища. Вплив на умови опромінення, наприклад на розмір променя на поверхні заготовки $d_{\Delta F}$, може виконуватися через зміння його просторових параметрів (D , θ). Але замість такого впливу на умови опромінення можна керувати тривалістю опромінення. В імпульсному варіанті технологічної операції для такого впливу рекомендують багатоімпульсну схему опромінення, а для безперервного режиму – швидкість відносного переміщення V тому, що тривалістю опромінення зони розміром $d_{\Delta F}$ є величина $t = d_{\Delta F} / V$, тобто із пришвидшенням технологічного руху енерговнесок зменшується і навпаки.

Пристрій, зображений на рис. 7 [16], працює таким чином. Для вибраних режимів обробки, в т.ч. для діаметра зони опромінення $d_{\Delta F}$ та вибраної перетворювальної лінзи 4 з фокусною відстанню F_4 , визначаються умови опромінення, тобто величина зміщення поверхні заготовки з фокальної площини лінзи ΔF_4 : $\Delta F_4 = (d_{\Delta F_4} - F_4 \theta) F_4 / D$ (θ – кут розбіжності променя, D – його діаметр). Далі вибираються параметри лінзи 3 для відбору частини потужності променя: діаметр центрального отвору в ній $D_0 < D$ та її фокусна відстань F_3 : $F_3 = F_{34}(F - a) / (F_4 - F_{34})$, де F_{34} – фокусна відстань об'єктива із двох лінз 3 та 4 з відстанню між ними $a \pm \Delta$. Робоча відстань об'єктива з двох лінз b_{34} буде дорівнювати: $b_{34} = F_{34}(1 - (a \pm \Delta) / F_3)$. На відстані $F_4 + \Delta F_4$ від головної площини лінзи 4 розміщують поверхню заготовки 13 та зміщують лінзу 3 на величину $\pm \Delta$ зі штатного її положення a для концентрації периферійної частини променя $D - D_0$ у кільце навколо зони опромінення діаметром d_k , яке повинне мати розмір $d_k = d_{\Delta F_4} + (0,1 - 0,5)$ мм. Процесор повинен мати програму підключення до вимірювача 9 тих секторів 8 (одного чи двох) з датчика 7, які розміщені зі сторони подачі заготовки. При зміні напрямку переміщення автоматично вибираються інші сектори датчика за тією ж умовою. Вимірювач 9 аналізує сигнал, отриманий від цих секторів, і, в разі

змінення його потужності, що визначає процесор 10, останній видає керуючий сигнал або на корекцію швидкості подачі V приводом 11, або на змінення потужності променя P через блок живлення 12.

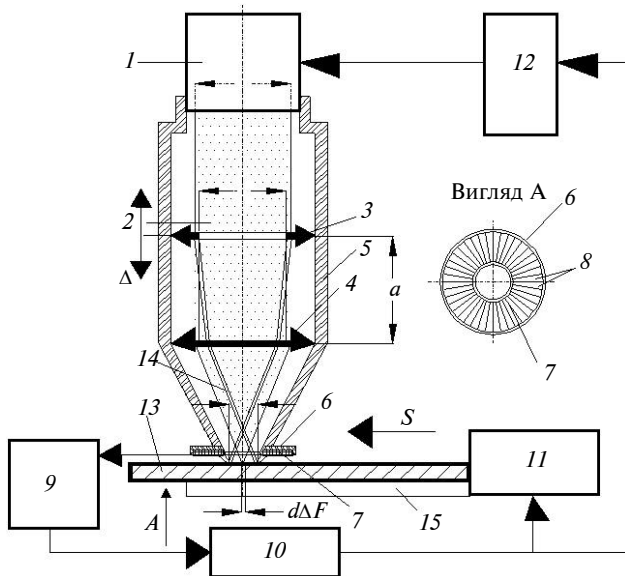


Рис. 7. Пристрій для опромінення поверхні заготовки з оптимізацією рівня поглинання енергії: 1 – лазер, 2 – промінь, 3 – лінза з отвором, 4 – перетворювальна лінза, 5 – корпус пристрою, 6 – кільце, 7 – система фотодатчиків у вигляді секторів, 8 – пара датчиків у напрямку подачі, 9 – фотострум у датчиках, 10 – процесор, 11 – привод подачі столу 15 ЛТУ, 12 – блок живлення лазера 1, 13 – заготовка, 14 – каустика кільцевого променя, 15 – стіл ЛТУ

Таким чином, враховується дійсний рівень поглинання ділянки поверхні заготовки перед її опроміненням, тобто досягається поставлена мета, причому із меншими матеріальними та часовими витратами.

Приклади застосування розроблених методик і пристроїв. Об'єктив для обробки отворів у заготовці із теплопровідного матеріалу було спроектовано за такою методикою:

- визначити режими обробки, в т.ч. розмір зони опромінення d_0 , за будь-якою з методик, наприклад [3];

- вибрати лінзу 2 (див. рис. 6) за розрахунковою фокусною відстанню: $F_{1p} = d_0 / \theta$ ($\theta \in 0 - \theta_D$, де θ_D – кут розбіжності променя на його найбільшому діаметрі D), найближчу із набору, що є в наявності $F_{1д} \approx F_{1p}$, та визначити потрібний рівень кута розбіжності променя: $\theta_{D_0} = d_0 / F_{1д}$;

- визначити діаметр центральної ділянки променя $4 D_0$, на рівні якого промінь має кут розбіжності, рівний θ_{D_0} : $D_0 = D(\theta_{D_0} / \theta_D)^{1/2}$;

- розрахувати фокусну відстань складеної лінзи 7–2 для периферійної частини променя 5 для концентрації її енергії в зону діаметром d_3 навколо отвору, що обробляється:

$$F_2 = \frac{D_0 F_{1д}}{D_0 - d_3};$$

- визначити ширину теплової зони b_3 , що необхідно для визначення енергетичного режиму її опромінення:

$$b_3 = \frac{F_2 - F_{1д}}{2F_2} (D - D_0);$$

- розрахувати величину радіуса кривизни передньої поверхні складеної лінзи 7–2 R_1 (її товщина δ):

$$R_1 = \frac{[\delta(n-1) - nR_2]F_2(n-1)}{n(R_2 - F_2(n-1))},$$

де $n \approx n_p = n_c$ – показники заломлення рідини та скла відповідно;

- визначити кутову швидкість обертання лінзи 2 для створення над нею лінзи 7:

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

- розрахувати об'єм рідини V_p як різницю об'ємів циліндра V_c висотою l_c (див. рис. 6, б) та усіченого сегмента $V_{s1} - V_{s2}$ з радіусом поверхні R_1 :

$$V_p = (V_{s1} - V_{s2}),$$

де $V_c = \pi(0,5D_c)^2 \times L_p$; $V_s = 1/3 \times \pi L_s^2(3R_1 - L_s)$;
 $L_s = R_1 = L_r$; $L_r = [R_1^2 - (0,5R_c)^2]^{1/2}$;

- визначити висоту шару рідини в нерухомому стакані 3:

$$L_p = 0,5\omega^2 \left[\frac{[(0,5D_0)^2 - (0,5D_c)^2]^2}{0,5D_c^2 g} \right].$$

Розрахована для обробки отворів $\varnothing 0,05$ мм у заготовці з М5 (технічна мідь) тепла зона розмірами: діаметром $d_3 = 0,15$ мм і шириною $b_3 = 0,055$ мм, була створена об'єктивом, який має вигляд стакану з внутрішнім діаметром $D_c = 30$ мм, дно якого є лінзою з фокусною

відстанню $F_1 = 50$ мм. Промінь від лазера на олександриті діаметром 6,6 мм, перетворений телескопом Галілея зі збільшенням $\Gamma = 3$ у промінь $D = 20$ мм при виправленому куті розбіжності $\theta \in 0-0,003$ (θ_D) рад, концентрувався в зону опромінення $d = d_0$ центральною частиною лінзи діаметром $D_0 = 11,5$ мм, кут розбіжності якого $\theta_{D_0} = 0,001$ рад. Його периферійна частина діянням рідкої лінзи з гліцерину та скляною лінзою з $F_1 = 50$ мм створювала променем теплову кільцеву зону $d_3 \times b_3$, для чого її обертали з кутовою швидкістю $\omega = 2,34$ с⁻¹ для перетворення шару рідини завтовшки $L_p = 1,23$ мм у додаткову лінзу, що разом із лінзою 2 створювала об'єктив із фокусною відстанню $F_2 = 50,66$ мм ($R_1 = 1771,01$ мм).

Висновки

Звуження промислового використання лазерної технології до рівня цеху, майстерні викликає занепад сучасної технології з втратою компетенцій її застосування внаслідок загублення знань та вміння використання класичного алгоритму проектування технологічних опе-

рацій із втратою їх можливостей та конкурентності.

З метою збереження навичок, які створено протягом багаторічних досліджень процесу діяння лазерного променя на заготовку, та на їх основі розроблено спрощені, але достатні для використання в багатьох випадках методики проектування одно- та багатокритеріальних задач, у яких виключено з процедури експериментального проектування найбільш складні для урахування критерії якості операцій, що спростило виконання процедури та підвищило ймовірність отримання позитивного результату.

Для компенсації втрачених можливостей проектування застосовано підвищену насиченість операції технологічним оснащенням, призначеним для оптимізації схем опромінення та створення адаптивних форм організації операцій обробки отворів, вирізання пазів, заготовок листової форми та поверхневого зміцнення.

Подовження розробленої методики створення операцій лазерної обробки на інші її види (виготовлення кліше, ремонт зношених виробів, безвідхідне розколювання алмазів, легування поверхонь тертя та інші) дасть змогу зберегти можливості лазерної технології на період відродження національної економіки.

Список літератури

1. Уляков П.И. Некоторые закономерности разрушения твердых сред излучением ОКГ // ЖЭТФ. – 1967. – 52, № 3. – С. 821–831.
2. Вейко В.П., Либенсон М.Н. Лазерная обработка. – Л.: Лениздат, 1973. – 192 с.
3. Steffen J. Prozessoptimierung blakus materialabtragenden bearbeitungs problemen ar Lasertrahlung // Teinverktechn. un messtechn. – 1979. – 87, № 7. – P. 309–320.
4. Herziger G., Stemme R., Weber H. Modulation technique to control laser material processing // IEEE J. Quantum Electron. – 1987. – 10, № 2. – P. 175–176.
5. Вейко В.П. Лазерная микрообработка. – СПб.: ГУ ИТМО, 2007. – 111 с.
6. Суслов Г.П., Либенсон М.Н., Кокора А.Н. Методы повышения точности лазерной размерной обработки. – Л.: Знание, 1973. – 40 с.
7. Тархов Г.Н. Светолучевая обработка материалов // Электрохим. и электрофиз. методы обр-ки материалов. – Тула: ТПИ, 1967. – С. 31–43.
8. Вакс Е.Д. Технология обработки деталей машин световым лучом. – М.: Машиностроение, 1974. – 32 с.
9. Satoshi N., Yasunao S., Kiichi T. Laser machining of thin film // Bull. Jap. Soc. Precis. Eng. – 1971. – 5, № 2. – P. 39–42.
10. Обработка деталей лучом лазера / В.М. Суминов, Е.В. Промыслов, А.К. Скворчевский, Б.Р. Кузин. – М.: Машиностроение, 1969. – 196 с.
11. Куликовская Н.И. Применение системы Галилея для плавного изменения расходимости пучка, излучаемого ОКГ // ОМП. – 1975. – № 12. – С. 19–21.
12. Лазерный излучатель для технологических установок: А.с. 1610707 СРСР, МКІ³ В23К 26/00 / В.П. Котляров, И.И. Штома (СРСР). – № 4683135/31–27; Заявл. 24.04.89 (без публ.)
13. Котляров В.П., Коваленко В.С., Анякин Н.И. ОКГ для лазерных технологических установок // Электрохим. и электрофиз. методы обр-ки материалов. – Тула: ТПИ, 1985. – С. 31–35.
14. Спосіб визначення режиму лазерного різання заготовок різної товщини: Патент 58166 України, МПК⁷ В23К 26/38 / В.П. Котляров, Е.О. Лаврінков (Україна). – № u201008461; Заявл. 06.07.10; Опубл. 11.04.11, Бюл. № 7. – 3 с.: іл.

15. *Об'єктив* для лазерної обробки: Патент 74855 України, МПК³ В23К 26/00 / В.П. Котляров, Д.В. Короткий (Україна). – № u201205710; Заявл. 10.05.2012; Опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21. – 3 с.: іл.
16. *Лазерна установка для опромінення поверхні заготовки*: Патент 106618 України, МПК³ В23К 26/04 / В.П. Котляров, В.Л. Дубнюк (Україна). – № u201512243; Заявл. 10.12.2015, Опубл. 25.04. 2016, Бюл. № 8. – 3 с.: іл.

References

- [1] P.I. Ulyakov, "Some conformities to law of destruction of hard environments by the radiation of OKG", *Zhurnal Jeksperimental'noj i Teoreticheskoy Fiziki*, vol. 52, no. 3, pp. 821–823, 1967 (in Russian).
- [2] V.P. Veyko and M.N. Libenson, *Laser Processing*. Leningrad, SU: Lenizdat, 1973 (in Russian).
- [3] J. Steffen, "Prozessoptimierung blakus materialabtragenden bearbeitungs problemen ar Lasertrahlung", *Teinverktechn. un messtechn.*, vol. 87, no 7, pp. 309-320, 1979.
- [4] G. Herziger *et al.*, "Modulation technique to control laser material processing", *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 10, no. 2, pp. 175–176, 1987. doi: 10.1109/JQE.1974.1145805
- [5] V.P. Veyko, *Laser Microprocessing*. Saint Petersburg, Russia: St. University "IFMO", 2007 (in Russian).
- [6] G.P. Suslov *et al.*, *Methods of Laser Dimensional Processing Accuracy Improvement*. Leningrad, SU: Znanie, 1973 (in Russian).
- [7] G.N. Tarhov, "Processing of materials by light rays", *El. Phys. & El. Chem. Methods of Materials Treat.*, pp. 31–43, 1967 (in Russian).
- [8] E.D. Vaks, *Technology of Machines Details Treatment by a Light Ray*. Moscow, SU: Mashinostroenie, 1974 (in Russian).
- [9] N. Satoshi *et al.*, "Laser machining of thin film", *Bull. Jap. Soc. Precis. Eng.*, vol. 5, no. 2, pp. 39–42, 1971.
- [10] V.M. Suminov *et al.*, *Processing of Parts by the Laser Ray*. Moscow, SU: Mashinostroenie, 1969, P. 196 (in Russian).
- [11] N.I. Kulikovskaya, "Application of the Galilei system for the smooth change of divergence angle of ray, radiated by OKG", *Optiko-Mehanicheskaja Promyshlennost'*, no. 12, pp. 19–21, 1975 (in Russian).
- [12] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Laser emitter for technological purposes", USSR Patent 1610707, April 24, 1989 (in Russian).
- [13] V.P. Kotlyarov *et al.*, "OKG for laser technological purposes", *El. Phys. & El. Chem. Methods of Materials Treat.*, Tula, SU: TPI, pp. 31–35, 1985 (in Russian).
- [14] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Method of the determination mode of the laser cutting of different thickness purveyances", Ukraine Patent 74855, Nov. 12, 2011 (in Ukrainian).
- [15] V.P. Kotlyarov *et al.*, "A lens is for laser processing", Ukraine Patent 58166, July 06, 2011 (in Ukrainian).
- [16] V.P. Kotlyarov *et al.*, "Laser equipment for processing of workpiece surface by ray", Ukraine Patent 106618, December 10, 2015 (in Ukrainian).

В.П. Котляров, О.М. Киященко

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ В УМОВАХ СУЧАСНОГО СТАНУ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ

Проблематика. Спад економіки України викликаний головним чином зниженням частки у ВВП промисловості з високим рівнем доданої вартості у своїх виробках. Неefективне використання нової техніки в сучасних технологіях пов'язане зі зниженням компетентності інженерних кадрів і всебічним порушенням технологічної дисципліни підготовки виробництва. До того ж більшість технологічних операцій виконується за принципом "job shop" малими ТОВ або іншими з низькою культурою виробництва.

Мета досліджень. Створення методики спрощеної технологічної підготовки найбільш поширених операцій лазерної обробки, яка не потребує спеціальних багатокритеріальних досліджень.

Методика реалізації. Суть розробленої методики полягає в розділенні процедури на два етапи: в першому беруться до уваги вимоги до об'єкта, які можуть бути враховані внаслідок спрощених розв'язків теплових задач нагрівання та руйнування матеріалу лазерним променем. Наступний етап проектування передбачає виконання решти вимог до результатів технологічної операції за рахунок модернізації схеми обробки та використання створеного технологічного оснащення.

Результати досліджень. Для обробки металевих виробів (отворів, лунок, ризок, пазів, гравірування та контурного вирізання) використано спрощене аналітичне розв'язання рівняння теплопровідності, яке адекватне при часовій та енергетичній стабілізації процедури опромінення. Контурне вирізання виробів із неметалів (деревини, пластмаси) проектується за розробленою схемою з адаптивною організацією технологічної операції. Виконання цього етапу проектування передбачає використання спеціальних засобів забезпечення операції. Дотримання вимог до показників якості операцій реалізується на другому етапі вдосконалення процедури опромінення, в т.ч. із застосуванням об'єктивів спеціальної конструкції, які підвищують її стабільність.

Висновки. Виконані розробки дали змогу досягти поставленої мети – оперативного технологічного забезпечення операцій лазерної обробки – з використанням аналітичного моделювання процесів обробки та додаткового вдосконалення операцій застосуванням спеціального технологічного оснащення.

Ключові слова: технологія; лазер; технологічна операція; технологічне оснащення; моделювання процесу; адаптивна форма організації.

В.П. Котляров, А.Н. Киященко

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНОЛОГИИ В УСЛОВИЯХ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОМЫШЛЕННОСТИ УКРАИНЫ

Проблематика. Спад економіки України вызван головним образом снижением доли в ВВП промышленности с высоким уровнем добавочной стоимости в своих изделиях. Неэффективное использование современной техники в современных технологиях связано со снижением компетентности инженерных кадров и всесторонним нарушением технологической дисциплины подготовки производства. К тому же большинство технологических операций выполняются по принципу "job shop" малыми ООО или другими с низкой культурой производства.

Цель исследований. Создание упрощенной методики технологической подготовки наиболее распространенных операций лазерной обработки, которая не требует специальных многокритериальных исследований.

Методика реализации. Суть разработанной методики заключается в выполнении процедуры в два этапа: на первом учитываются требования к объекту, которые могут быть учтены в результате упрощенных решений тепловых задач нагревания и разрушения материала лазерным лучом. Следующий этап проектирования предусматривает выполнение остальных требований к результатам технологической операции за счет модернизации схемы обработки и использования созданной технологической оснастки.

Результаты исследований. Для обработки металлических изделий (отверстий, лунок, рисок, пазов, гравирования и контурной вырезки) использовано упрощенное аналитическое решение уравнения теплопроводности, которое адекватно при временной и энергетической стабилизации процедуры облучения. Контурная вырезка изделий из неметаллов (древесины, пластмассы) проектируется по разработанной схеме с адаптивной организацией технологической операции. Выполнение этого этапа проектирования предусматривает использование специальных средств обеспечения операции. Соблюдение требований к показателям качества операций реализуется на втором этапе путем совершенствования процедуры облучения, в т.ч. с применением объективов специальной конструкции, которые повышают ее стабильность.

Выводы. Выполненные разработки позволили достичь поставленной цели – оперативного технологического обеспечения операций лазерной обработки – при использовании аналитического моделирования процессов обработки и дополнительного совершенствования операций использованием специальной технологической оснастки.

Ключевые слова: технология; лазер; технологическая операция; технологическая оснастка; моделирование процесса; адаптивная форма организации.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції
12 січня 2017 року