

УДК 621.375.826:621

В.П. Котляров, Мохаммад Алі Аліверді

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ВІДНОСНОГО ПОЗИЦІЮВАННЯ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ І ЗАГОТОВКИ

Вступ

Налагодження технологічної системи обробки містить перехід відносного позиціювання інструменту і заготовки. Якщо в механічній обробці, наприклад, ця процедура не створює труднощів для технолога або оператора, то використанню відомих пристроїв і методик при лазерній обробці заважають такі особливості інструменту (пучка випромінювання), як нематеріальність (разом із невидимістю) та висока енергонасиченість. Оскільки від якості цієї складової технологічної підготовки операції залежить якість результатів обробки, то її продуктивність та умови роботи оператора, систематизація і аналіз відомих методів налагодження та розробка і дослідження можливостей нових становлять практичний і науковий інтерес. Останнє зумовлено тим, що властивості не всіх видів пучків лазерного випромінювання описуються аналітичними залежностями щодо можливостей розрахунку результатів їх перетворення оптичними елементами (дзеркалами, лінзами). Це значить, що для найбільш поширених у технології лазерної обробки багатомодових пучків (TEM_{mn}) їх заміна в розрахунках на "променевиї пакет" [1] призводить до спотворення параметрів каустики сфокусованого пучка, до похибки в його орієнтації відносно поверхні заготовки і в результаті – до низької якості обробки. Тому тільки під час експериментальних досліджень можна визначити часові і реальні показники точності позиціювання заготовки в каустиці пучка випромінювання для різних методів налагодження.

Аналізуючи традиційний [2] і сучасний [3] варіанти методу налагодження оптичних систем на об'єкт, які застосовуються в новітніх лазерних технологічних установках фірми "LASAG" KLS 246, SLS 200 та KLS 246 MC20, можна визнати, що за кілька десятків років вони вдосконалювалися лише завдяки модернізації елементів пристроїв: використанню лазерних освітлювачів, інтерференційних дзеркал, просвітленню поверхонь оптичних складових тощо.

Інша методика, яку було запропоновано в [4–6] і розвинуто в [7], за певних обставин не була досліджена, розроблена в конструкції та описана в літературі щодо її застосовності і реальних можливостей (точності позиціювання, трудомісткості та продуктивності).

Постановка задачі

Враховуючи важливість якості виконання процедури налагодження відносного положення пучка випромінювання і заготовки для результатів технологічної операції лазерної обробки, ми поставили собі за мету в даній статті систематизувати та проаналізувати відомі методи позиціювання заготовки в пучку випромінювання, дослідити показники якості, продуктивності і трудомісткості запропонованого методу позиціювання та розробити проекти модернізації серійних оптичних систем СОК-1 (Росія) або Head ВАК 4 (Швейцарія), використовуючи результати досліджень.

Систематизація методів позиціювання

У зв'язку із складністю виконання процедури відносного позиціювання пучка випромінювання і заготовки використовується один із чотирьох методів її реалізації.

1. Позиціювання заготовки у тривимірному просторі на основі результатів обміру каустики пучка, сфокусованого об'єктивом (дзеркалом). Пучок випромінювання повинен мати параметри (енергетичні, часові та просторові), які застосовуються при обробці, тому можливі такі методи обміру:

а) відображення поздовжнього профілю каустики (в районі передбачуваного використання) через її координатний перетин похилою (до осі пучка) пластиною, на поверхні якої випромінювання залишає слід [8]. Заготовка позиціонується без променя в координатах обміру в перетині каустики відповідного розміру;

б) пошук перетину каустики пучка випромінювання з розмірами і формою, які вибрано для обробки, по черговою зміною різних за розміром отворів, зроблених у диску із стійкого до випромінювання матеріалу, який переміщується поперек і вздовж осі пучка [9]. Далі заготовка розміщується в координатній сітці обміру (без променя) у визначеному перетині каустики.

2. Налагодження при опромінюванні поверхні заготовки ослабленим (відносно режиму обробки) променем переміщенням заготовки

вздовж осі променя та виміру рівня променистої енергії, відбитої її поверхнею [10]. В міру наближення до перетину каустики він повинен зменшуватися (на думку авторів) внаслідок підігріву поверхні та збільшення її коефіцієнта поглинання, тобто цей метод придатний для позиціонування заготовки лише в перетині мінімального розміру перетяжки каустики.

3. Візуальні методи налагодження виконуються при освітленні заготовки випромінюванням видимої частини спектра і складаються із спостереження зображення її поверхні через мікроскоп (окуляр і робочий об'єктив, якщо об'єктив виготовлено з прозорого матеріалу для видимого випромінювання) та оцінки спостережуваного зображення:

а) за розміром пучка від додаткового джерела на поверхні заготовки, якщо освітлювач – малопотужний лазер (He-Ne або напівпровідниковий), промінь якого замінює випромінювання робочого (основного) лазера на час налагодження. Найменший розмір зображення свідчить про те, що поверхня заготовки знаходиться в перетині перетяжки каустики додаткового променя, перетвореного об'єктивом;

б) за якістю (різкістю) зображення поверхні заготовки при боковому її освітленні (в тому числі й лампою розжарювання) [2, 3]: найбільша різкість свідчить про збіг плоскості різкого зображення мікроскопа з поверхнею заготовки, яку освітлено променем освітлювача.

Налагодження виконується відносним осьовим переміщенням об'єктива та заготовки.

4. У даній групі методів використано прогресивний метод оцінки ступеня налагодження – метод подвійного зображення [11], який застосовується у фотоапаратах з відеощукачем (ФЕД, Зоркий) та в інструментальних мікроскопах (УИМ-21, УИМ-23 і УИМ-24) з подільною шкали (відповідно і точністю відліку) 1 мкм. Для створення двох (або більше) зображень на поверхні заготовки 1 (рис. 1) на неї через об'єктив 2 направляються два [5] або більше [6] тонких видимих променя 3 і 4 від малопотужного лазера. Після їх переломлення об'єктивом 2 на поверхні заготовки створюються дві або більше освітлені ділянки 5 і 6, розмір яких та взаємне розміщення визначаються положенням заготовки в каустиці цих променів, перетворених об'єктивом: чим ближче до перетяжки ($\Delta f \rightarrow 0$), тим менше їх розмір і щільніше вони розміщені. Таким чином, оцінюючи суперпозицію освітлених ділянок, можна, по-перше, знаходити напрямок віднос-

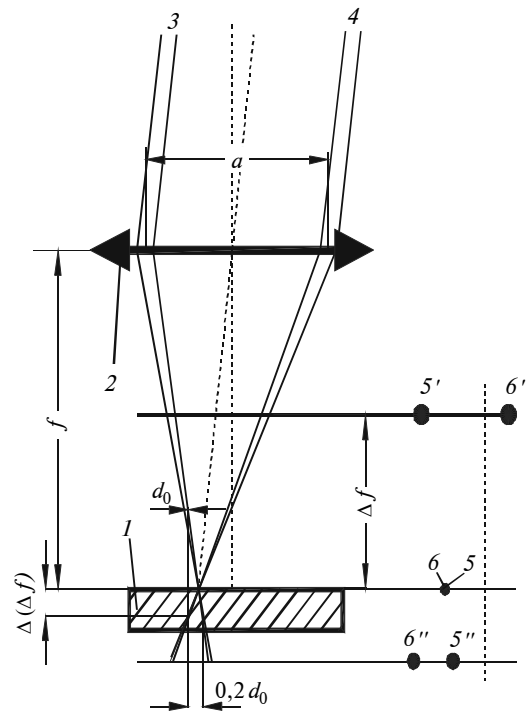


Рис. 1. Схема способу позиціонування за методом подвійного зображення

ного зміщення об'єктива та заготовки для виконання процедури позиціонування, а по-друге, визначати закінчення етапу налагодження за фактом збігу окремих ділянок.

Аналіз особливостей методів позиціонування

Наведені вище методи відносного позиціонування заготовки і лазерного променя слід оцінювати такими показниками, як продуктивність процедури, трудомісткість її виконання, включаючи умови праці оператора і придатність до автоматизації, та точність налагодження.

Метод з попереднім аналізом каустики сфокусованого променя (метод 1) дає можливість, в принципі, розмістити заготовку в будь-якому перетині каустики, де створюються задані умови опромінювання, однак з низькою (метод 1, а) та невисокою (метод 1, б) точністю, що визначає її придатність лише для технологічних операцій, не критичних до умов опромінювання (зварювання, зміцнення поверхні тощо). Метод досить трудомісткий, малопродуктивний та важко автоматизується.

Використання ослабленого променя (метод 2) на етапі налагодження технологічної обробляючої системи, параметри якого істотно відрізняються від робочого, потребує додаткових заходів для корекції положення заготовки

при необхідності її розміщення в перетяжці каустики або з розмірним зміщенням ($\Delta f \neq 0$). Метод також досить трудомісткий і малопродуктивний, але доступний для автоматизації. Точність позиювання визначається можливістю точної оцінки різниці у просторових (кутових і розмірних) параметрах робочого та ослабленого пучків випромінювання.

Візуальні методи налагодження (метод 3) дають можливість позиювання заготовки в перетяжку каустики сфокусованого променя додаткового лазера (метод 3, а) або у фокальну площину об'єктива при боковому освітленні заготовки світлом від додаткового джерела (метод 3, б). Точність налагодження залежить від збільшення мікроскопа, за допомогою якого оцінюється різкість зображення поверхні заготовки, від її шорсткості та якості зору оператора. Тому процедура налагодження складна, тривала і потребує використання додаткових пристроїв для розмірного зміщення заготовки у визначений розрахунками перетин каустики.

Робота оператора значно полегшується, а тривалість процедури скорочується, якщо її результат оцінювати не за різкістю зображення поверхні заготовки, а за взаємним розміщенням на ній ділянок, освітлених тонкими променями від додаткового лазера (метод 4, див. рис. 1). При візуальному спостереженні через мікроскоп, якщо можлива похибка взаємного розміщення ділянок у межах 20% від їх розміру d_0 , то похибка позиювання для $f = 20$ мм і $\theta = 0,001$ рад та $b = 15$ мм становитиме

$$\Delta(\Delta f) = \frac{(0,2f\theta)f}{b} \approx 0,005 \text{ мм,}$$

що набагато менше глибини зображуваного простору системи окуляр–об'єктив [11]:

$$T = \frac{250\varepsilon}{A\Gamma} + \frac{250}{\Gamma^{*2}} + \frac{\lambda}{2A^2} = \frac{250 \cdot 0,0003}{0,51 \cdot 100} + \frac{250}{16^2} + \frac{0,0006328}{2 \cdot 0,51^2} = 0,97656 \text{ мм,}$$

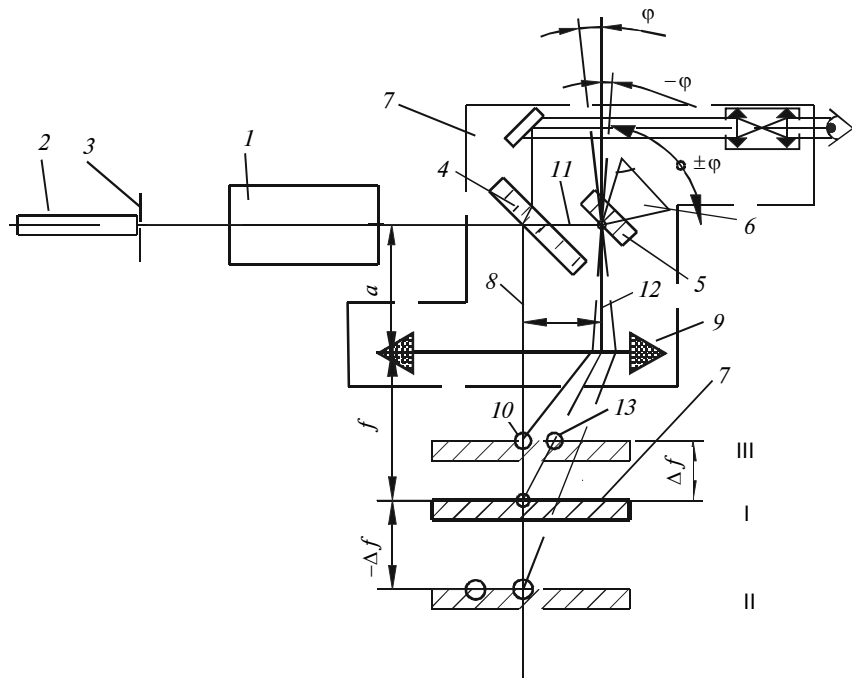


Рис. 2. Схема пристрою для реалізації налагодження оптичної системи за методом подвійного зображення

де ε – кутовий розмір роздільної здатності ока (0,0003 рад); $A = n_c \sin(D/2f)$ – числова апертура об'єктива (D – діаметр пучка в головній площині об'єктива; n_c – показник переломлення у просторі зображення); Γ^* – збільшення окуляра ($\Gamma^* = 16$); Γ – видиме збільшення системи спостереження; λ – довжина хвилі (для He-Ne-лазера – 0,0006328 мм). (Числові дані вибрано для оптичної системи СОК-1.)

Крім того, для виправлення помилки розміщення поверхні заготовки через хроматичну аберацію положення потрібні додаткові дії, тоді як із розробленим пристроєм (рис. 2) можна здійснювати налагодження будь-якого відносного положення об'єктива та поверхні заготовки при установці дзеркала 5 на кут, розрахований за рівнянням

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

де a і b – конструктивні параметри пристрою (див. рис. 2); Δf – величина потрібного зміщення поверхні заготовки з фокальної площини об'єктива у світлі додаткового джерела. Чим точніше буде визначено значення Δf , тобто більше відмінностей між променями додатко-

вого та робочого лазерів буде враховано, тим меншою очікується похибка позиціювання.

Експериментальні дослідження методу і способу позиціювання

Експериментально досліджено точність і продуктивність процесу позиціювання за відомим та запропонованими методами (методи 3, б і 4, відповідно) при їх застосуванні при використанні оптичної системи СОК-1, з якою постачалося раніше серійне лазерне технологічне обладнання СРСР, а тепер – Росії (серії “Квант”) та України (серії ГПЛТ).

Методикою випробувань передбачалось виконання налагодження відносного положення заготовок із різною шорсткістю (R_z) і похилою під різними кутами (β) поверхнею та об'єктивів, які мали різні фокусні відстані (f), з оцінкою якості процедури за різкістю зображення поверхні (метод 3, б) або положення двох зображень на ній (метод 4) через окуляр із різним збільшенням (Γ^*). Для реалізації останньої методики система СОК-1 була модернізована розміщенням за 100 %-ним дзеркалом 1 резонатора основного лазера (див. рис. 2) додаткового (2) гелій-неонового випромінювача ЛГ-208, промінь якого зменшено діафрагмою 3 до діаметра 0,3 мм (див. рис. 2), а за поворотним похилим дзеркалом 4 СОК-1 – додаткового, з 50 %-ним відбиттям для довжини хвилі додаткового лазера ($\lambda = 0,6328$ мкм), дзеркала 5 із приводом його повороту 6 на кут $\pm 2^\circ$ відносно положення, паралельного дзеркалу 4, що для наведеного вище прикладу відповідає зміщенню $\Delta f = \pm 0,6$ мм. Дискретність повороту ($0,2^\circ$) забезпечується передавальним відношенням приводу 6, який становить $i = 300$.

У табл. 1 наведено межі факторного простору і дискретність варіювання керованих факторів у натуральних (f, Γ^*, R_z, β) величинах та кодових позначеннях ($x_1 \dots x_4$) в експерименті за композиційним ротатбельним квазі- D оптимальним планом Бокса на сфері 2^4 [12].

Точність позиціювання оцінювалася величиною поля розсіяння положень поверхні заготовки $6S_n$ (S_n – середньоквадратичне відхилення положення поверхні заготовки від середнього) за умови багатократного повторення операції (три спроби по три виміри) та визначення її реального положення за допомогою

індикатора годинникового типу з поділкою шкали 5 мкм. Тривалість налагодження t визначалася як середнє арифметичне багатократних (за дев'ятьма спробами) замірів положення дев'ятьма операторами з одного й того ж початкового положення поверхні відносно об'єктива, причому кожна спроба робилася за умови спостереження іншої ділянки поверхні в полі зору мікроскопа. Цими засобами, а також рандомізованим порядком виконання плану експерименту (включаючи повторні спроби) усунуто вплив суб'єктивних якостей оператора, його звикання до картинки шорсткості поверхні та систематичні похибки операції.

Таблиця 1. Кодові позначення і натуральні величини

Керовані фактори	Кодові позначення	$f(x_1)$, мм	$\Gamma^*(x_2)$, раз	$R_z(x_3)$, мкм	$\beta(x_4)$, град
Інтервал варіювання	$\Delta x_i = 1$	25	4	2,5	15
Основний рівень	0	75	12	5,0	30
Верхній рівень	+1	100	16	7,5	45
Нижній рівень	-1	50	8,3	2,5	15
Зіркове плече	+2	125	20	10,0	60
	-2	25	10	0,8	0

Таблиця 2. Показники процесу налагодження

Критерій узгодженості	Показники процесу налагодження			
	за методом 3, а		за методом 4	
	S_{n1}	t_{n1}	S_{n2}	t_{n2}
$w_{i \min}$	0,772	0,963	0,793	0,888
$w_{i \text{табл}}$	0,767	0,829	0,767	0,829
G_p (Кохрена)	0,134	0,060	0,231	0,1–3
$G_{\text{табл}}$ (Кохрена)	0,233	0,118	0,233	0,118
F_p	1,514	0,45	0,24	0,162
$F_{\text{табл}}$	1,80	1,72	1,77	1,60

Моделі точності і тривалості налагодження постулювались у вигляді багаточленів другого порядку, які будувались поетапно при використанні можливості композиційного планування. Дані статистичної обробки одержаних результатів наведено в табл. 2. Аналізуючи їх, можна зробити такі висновки:

- вихідні показники розподілені нормально, що підтверджує можливість оцінки точності операції величиною $6S_n$ із ймовірністю більше 99 % (критерій узгодженості $w_u > w_{u\text{табл}}$);

- досліджуваний процес відтворюваний, що підтверджується однорідністю дисперсій (критерій узгодженості $G_p > G_{\text{табл}}$);

- одержані моделі адекватно описують досліджений об'єкт (коефіцієнт Фішера $F_p > F_{\text{табл}}$ для рівня значущості $\alpha = 0,05$).

Коефіцієнти регресії моделей процесу налагодження для показників S_n і t_n наведено в табл. 3.

Аналізуючи одержані залежності можна визначити, що:

- другий спосіб позиціювання більш *точний* в усьому діапазоні змінювання f і Γ^* ;

- фокусна відстань об'єктива f і збільшення окуляра Γ^* найсильніше, але по-різному, впливають на показник *точності* позиціювання $6S_n$: перший – внаслідок збільшення глибини різкості системи спостереження при використанні довгофокусних об'єктивів погіршує якість налагодження, а другий – із збільшенням дає можливість якісніше оцінювати результат позиціювання, тобто точніше його виконувати;

- при обробці заготовок з похилою поверхнею і з низьким рівнем її шорсткості важче оцінювати результат налагодження, тому *точність* операції нижча;

- на *тривалість* процесу позиціювання по кожному методу впливає різна кількість факторів (див. табл. 3): збільшення f для першого методу дає можливість раніше оцінити початкове положення поверхні відносно заданого та безпомилково визначити напрямок її зміщення, тобто скоротити час налагодження; відсутність такої залежності для другого методу означає малий вплив цього фактора на швидкість позиціювання;

- протилежний вплив збільшення окуляра (Γ^*) на *тривалість* процедури для першого і другого методів пояснюється тим, що це в першому випадку діє протилежно фактору f , а в другому – деталізація внаслідок цього діяння зображення дає можливість впевненіше виконувати налагодження;

- збільшення кута нахилу поверхні β і її шорсткості R_z дає можливість за першим методом раніше визначити напрямок відносного зсуву поверхні та об'єктива, що прискорює процес налагодження, тоді як для другого зміна величини R_z не впливає на *швидкість* процедури, а збільшення кута нахилу обмежує зону його інформованості про хід налагодження та уповільнює його.

За одержаними даними можна оптимізувати склад оптичної системи (f і Γ^*) із врахуванням заданої точності позиціювання, якості поверхні заготовки (R_z) та її нахилу (β). На рис. 3, а зображено вплив на точність позиціювання ($6S_n$) параметрів оптичної системи (для поверхні з $R_z = 5,0$ мкм і $\beta = 0^\circ$), а на рис. 3, б – залежність тривалості процедури t від збільшення окуляра Γ^* та характеристик поверхні (для $f = 50$ мм). Наприклад, необхідно визначити оптимальні параметри оптичної системи для позиціювання вибраного за режимами обробки об'єктива з $f = 50$ мм відносно поверхні з $R_z = 5,0$ мкм та $\beta = 0^\circ$ з похибкою $\pm 3S_n \leq 0,3$ мм. З рис. 3, а вибираємо окуляр за умови $\Gamma^* > 8,3$ (за методом 4). При цьому з рис. 3, б видно, що найпродуктивнішим ($t < 5$ с) буде процес, який виконується з окуляром $\Gamma^* = 14$. Для методу позиціювання 3, а (за тих же умов) одержано такі результати: $\Gamma^* > 16$ і $t = 27$ с та $t = 37$ с для $R_z \rightarrow 0$.

Таблиця 3. Коефіцієнти регресії

Показник	b_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_{11}	b_{22}	b_{22}	b_{13}	b_{14}	b_{24}
S_{n1}	145	35	-22	17	13	25	25	-	-	-	15
t_{n1}	10,0	-5,0	4,5	-1,0	-2,2	0,8	0,7	-2,5	0,8	1,3	-1,1
S_{n2}	85	25	-20	-	-	15	-	-	-	-	-
t_{n2}	10,4	0,8	-4,0	-	2,8	-	0,6	-	-	-	-1,4

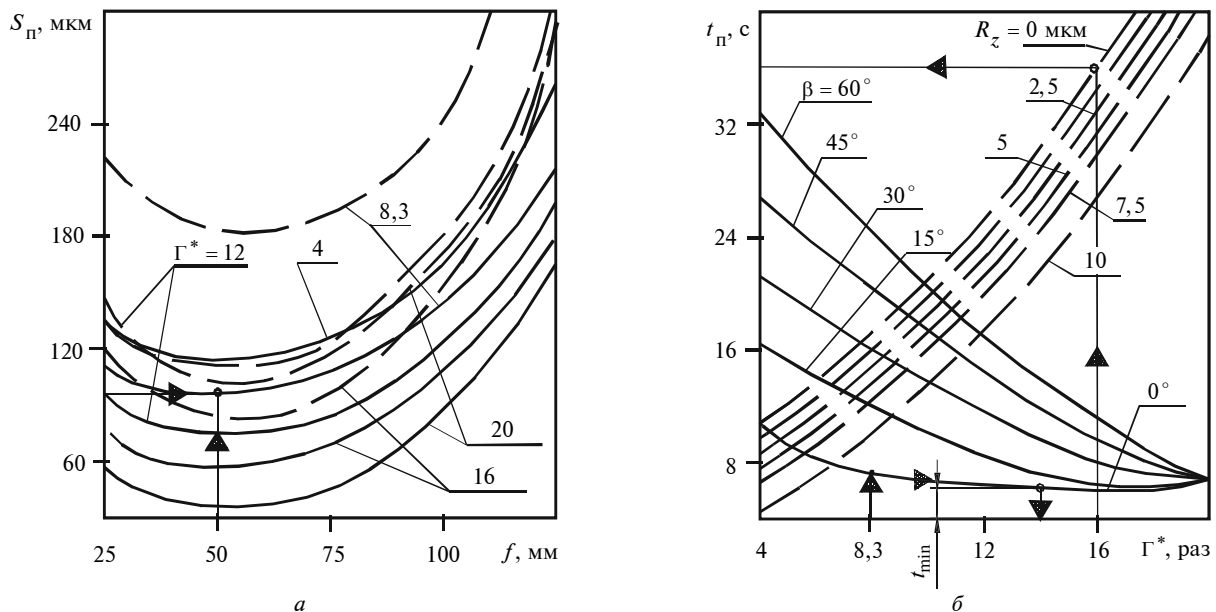


Рис. 3. Результати експериментальних досліджень процесу позиціонування заготовки: ——— — методом 4; - - - - методом 3, а

Розробка пристроїв для візуального налагодження оптичної системи

При створенні конструкцій оптичних систем для лазерної обробки з позиціонуванням об'єктива за методом подвійного зображення розв'язується задача його реалізації в системах, якими оснащено серійне лазерне технологічне обладнання, в тому числі й те, що перебуває в експлуатації, тобто модернізації систем. До таких систем можна віднести вітчизняні оптичні системи "Коростель", СОК-1 та виробництва швейцарської фірми LASAG. Загальним для цих систем є наявність похилого дзеркала для сполучення осей робочого випромінювання та об'єктива, а також наглядової системи з комбінації останнього з окуляром (фокальний телескоп Кеплера). Для такої конструкції зручно як додатковий лазерний освітлювач 2 використати газовий лазер ЛГ-208 (He-Ne з $\lambda = 0,6328$ мкм) або напівпровідниковий $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($\lambda = 0,62$ мкм), який розміщують за 100%-ним дзеркалом робочого випромінювача 1 співвісно з ним (див. рис. 2). Внаслідок того, що серійні оптичні системи використовуються з твердотільними лазерами, конструктивні елементи яких (матриця активного елемента, підкладки дзеркал) та інтерференційні покриття прозорі для видимого світла, світло від освітлювача досягає оптичної системи 7 і частково відбивається (до 10% потужності) від поверхні похилого дзеркала 4, а його залишки проходять че-

рез нього. Відбитий промінь 8 надходить співвісно на об'єктив 9, переломлюється ним (12) і досягає поверхні 7 заготовки, формуючи перше зображення 10. Для формування другого зображення 13 на шляху променя 11 розміщують похиле 100%-не (для додаткового променя) дзеркало 5 з приводом 6 для зміни кута нахилу β . Внаслідок того, що передавальне число приводу повинно перевищувати значення $i = 300$, щоб досягти бажаної дискретності зміни кута нахилу дзеркала 5 менше однієї хвилини, в його конструкції мають використовуватися багатоланцюгові перетворювачі руху: з кількома важелями, важельно-кулачкові, важельно-гвинтові, багатоступеневі зубчасті та ін. Для найбільш поширеної оптичної системи СОК-1 ми створили кілька конструкцій приводу, в тому числі з хвильовим редуктором, який разом із додатковим дзеркалом монтується в корпусі СОК-1, не впливаючи на її штатну працездатність.

Висновки

Підсумовуючи результати, отримані при дослідженнях, можна зробити відповідні висновки.

1. Для спрощення, прискорення і підвищення якості виконання відповідальної процедури технологічної підготовки операцій лазерної обробки (відносно позиціонування інструмента і поверхні заготовки) доступна модерні-

зація засобів її реалізації на базі нового розробленого авторами методу.

2. Теоретичні припущення про переваги запропонованого методу підтверджено експериментальними випробовуваннями, внаслідок яких одержано відповідні порівняльні характеристики, а також розв'язано методично і практично задачу оптимізації характеристик оптичної системи із врахуванням властивостей заготовки, потрібної точності процедури та найвищої продуктивності при полегшенні праці оператора.

3. Деякі конструктивні розробки авторів з модернізації оптичної системи СОК-1 можуть бути запропоновані для виробників та користувачів лазерного обладнання.

4. Подальше вдосконалення методу позиціонування з покращенням результатів та умов праці оператора може бути досягнуто в разі подачі променів 3 і 4 (див. рис. 1) різного кольору [7], наприклад синього і жовтого, тоді забарвлення поля зору у змішаний колір (зелений) буде ознакою закінчення процедури. Якщо промені 3 і 4 – промені одночастотного випромінювання, то при $a = (2k - 1)\lambda/2$ (k – ціле число) зникнення освітлених ділянок при їх збігові буде ознакою закінчення процедури, що також сприяє полегшенню роботи оператора. Конструювання пристроїв з цими вдосконаленнями та визначення їх експлуатаційних характеристик є метою подальших досліджень авторів.

В.П. Котляров, Мохаммад Али Аливерди

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОТНОСИТЕЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ПУЧКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАГОТОВКИ

В результате анализа проблем позиционирования пучка лазерного излучения и заготовки решена задача упрощения процедуры и модернизации оптических систем методом двойного изображения.

V.P. Kotlyarov, Mohammad Ali Aliverdi

THE METHODS AND DEVICES FOR RELATIVE ALIGNMENT OF LASER RADIATION BUNCH AND WORKPIECE

Using the double image method, we solve the problem of simplification of procedure and upgrade of optical systems. To solve this problem, we analyze the alignment of laser radiation bunch and workpiece.

1. Пахомов И.Г., Цибуля А.Б. Расчет оптических систем лазерных приборов. – М.: Радиосвязь, 1986. – 152 с.
2. Турыгин И.А. Прикладная оптика. – М.: Машиностроение, 1965. – 305 с.
3. Laser processing head ВАК 4. Catalogue Lasag – the company brochure, 2008. – Р. 4 (www/lasers@lasag.ch).
4. А.с. СРСР № 694330 В23К 26/00 від 06.07.1979 р. Устройство для лазерной обработки / В.П. Котляров, В.С. Коваленко.
5. Заявка Японии № 58-154480 В23К 26/00 від 13.09.1983 р.
6. Заявка Японии № 56-119688 В23К 26/02 від 19.09.1981 р.
7. А.с. СРСР № 824107 G02В 27/40 від 22.12.1980 р. Способ фокусирования оптических систем на объект / В.П. Котляров.
8. Заявка Японии № 57-32510 В23К 26/02 від 05.07.1982 р.
9. Патент США № 4472055 G01В 11/14 від 18.09.1984 р.
10. Заявка Японии № 56-28630 В23К 26/04 від 06.10.1981 р.
11. Оптические приборы в машиностроении: Справочник / М.И. Апенко, И.П. Араев, В.А. Афанасьев и др. – М.: Машиностроение, 1974. – 238 с.
12. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. – М.: Машиностроение, 1980. – 304 с.

Рекомендована Радою
Механіко-машинобудівного інституту
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
10 грудня 2008 року