

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ігоря Сікорського»

Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра лазерної техніки та фізико-технічних технологій

«На правах рукопису»

«До захисту допущено»

УДК 621.375.826:621

Завідувач кафедри
_____ І.В. Кривцун

« ____ » _____ 2018р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

зі спеціальності: 131 «Прикладна механіка
за спеціалізацією: «Лазерна техніка та процеси фізико-технічної обробки
матеріалів»

на тему:

**«Технологічне забезпечення операцій лазерної обробки в умовах
сучасного стану виробництва»**

Студент групи МЛ-71м Киященко Олександр Миколайович _____

Науковий керівник доктор технічних наук, професор Котляров В.П. _____

Консультанти:

-з економічних питань _____

Відповідальність за плагіат усвідомлюю

ст. О.М. Киященко

Київ – 2018

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри

_____ І.В.Кривцун

«__» _____ 2018р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію

студенту Киященко Олександр Миколайовичу

1. Тема дисертації: **«Технологічне забезпечення операцій лазерної обробки в умовах сучасного стану виробництва»**,

затверджена наказом по університету від «__» _____ 20__ р. № _____

2. Термін здачі студентом оформленої дисертації «20» травня 2018р.

3. Об'єкт дослідження: Процес обробки матеріалів лазерним променем.

4. Предмет дослідження: Технологічні операції лазерної обробки

5. Перелік питань, які мають бути розроблені: _____

1) Проаналізувати стан технологічного забезпечення операцій лазерної обробки на етапі їх проектування та реалізації. Визначити проблеми, супроводжуючі повноцінне проектування за прийнятними методиками та їх залежність від ступеня складності предмету досліджень.

2) Оцінити можливість застосування класичних методик проектування операцій в складних умовах стану економіки підприємства або у відсутності кваліфікованого персоналу та відповідного обладнання.

3) На базі аналізу дійсного стану можливостей (технологічних та економічних) найбільш застосованих видів операцій лазерної обробки (поверхневої термообробки, контурного розрізання листових заготовок та прецизійної обробки) встановити критичні для виконання показники із технічного завдання на їх проектування.

4) Встановити засоби та способи позарежимного впливу на визначені показники, оцінити аналітично або експериментально їх практичні можливості з урахуванням затрат на їх впровадження.

5) Зробити висновки за результатами складеного бізнес плану.

б) Дата видачі завдання «__» _____ 2017 р.

Науковий керівник _____ В.П. Котляров

Завдання прийняв до виконання _____ О.М. Киященко

Зміст

Вступ	2
Розділ 1. Огляд методів проектування операцій лазерної обробки	6
1.1. Методи моделювання процесів лазерної обробки	7
1.1.1. Аналітичні методи моделювання процесів лазерної обробки	8
1.1.2. Експериментальні методи дослідження процесу лазерної обробки	12
Мета роботи, задачі досліджень	14
Розділ 2. Режимне забезпечення технологічних операцій лазерної обробки	16
2.1. Операції поверхневої термообробки	16
2.2. Операції розкроювання листових заготовок газолазерним розрізанням	22
2.3. Операції розмірній (прецизійної) обробки	30
2.4. Висновки до розділу	36
Розділ 3. Технологічні прийоми і засоби підтримки норм якості операцій	38
3.1. Операції поверхневої термообробки	38
3.1.1. Методи стабілізації рівня поглиненої енергії	40
3.1.2. Облаштування для поліпшення характеристик оброблювального інструменту	42
3.2. Операції газолазерного розкрою листового матеріалу	43
3.3. Операції розмірної (прецизійної) обробки	51
3.3.1 Підвищення ефективності використання джерела в зоні опромінення	52
3.3.2. Оптимальна організація технологічної операції	56
3.3.3. Адаптивна форма організації операції прецизійної обробки	60
Розділ 4. Розроблення стартап-проекту	
Висновки за роботою	
Використані джерела	
Додатки	

Вступ

Актуальність теми. Аналізуючи сучасний стан лазерної технології в Україні, пов'язаний із станом залишків її промисловості, необхідно відзначити, що вони потерпають однаково та взаємо залежно від падіння попиту на результати їх застосування та можливості використання. Руйнування класичної організації технологічного забезпечення якості продукції (технологічної культури виробництва) призводить до зниження потреби в кваліфікованому інженерному персоналі, в застосуванні науково обґрунтованих розробок, зокрема, в області лазерної технології та перетворюють виробництво в споживачів не тільки імпортного обладнання, а і пов'язаних та куплених з останнім «імпортних» конкретних режимів обробки. Методика їх обрання залишається таємницею, або коштує співрозмірно з ціною обладнання, тому змінення умов операції викликає потребу її нового регламентування. Використання класичної за алгоритмом методики проектування з урахуванням повного набору вимог технічного завдання (ТЗ) на операцію потребує виконання як аналітичних так і експериментальних дій, що вимагає відповідної кваліфікації та дослідницького обладнання. Враховуючи, що основними споживачами лазерної технології залишилися невеликі приватні підприємства та деякі держпідприємства, які обмежені в можливостях режимного забезпечення операцій лазерної обробки тим, чи іншим шляхом, нам здається *актуальною* розробка інформаційного, програмного та технічного забезпечення процедури проектування за спрощеним алгоритмом без втрати її якості.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Магістерська дисертація виконана на кафедрі лазерної техніки та фізико-технічних технологій в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» у відповідності з тематичним планом науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України і є частиною досліджень держбюджетної теми №??????? «XXXXXXXXX».

Мета і задачі дослідження: Мета роботи полягає у створенні інформаційного та програмного забезпечення процедури проектування технологічних операцій лазерної обробки спрощеним алгоритмом без втрати її якості.

Для досягнення мети було поставлено **наступні задачі:**

- проаналізувати сучасні методи проектування операцій лазерної обробки (поверхневого гартування, контурного газолазерного розрізання листового матеріалу та прецизійної обробки) та визначити для кожної з них придатність моделей для використання та глибину їх опису процесу обробки;
- виконати аналіз керованості процесом обробки, в першу чергу, якісними її показниками, факторами, які складають їх відповідні моделі;
- дослідити ступінь впливу керуємих факторів на складові сумарної похибки розмірних результатів технологічних операцій та ступінь їх керованості можливостями лазерної техніки;
- розробити засоби та способи нережимного впливу на якість технологічних операцій відповідно до результатів аналізу сумарної похибки їх розмірних результатів.

Об'єкт досліджень – процес обробки матеріалів лазерним променем.

Предмет досліджень - технологічні операції лазерної обробки.

Методи дослідження. Виконані дослідження базуються на методах математичного моделювання за методикою повно факторних експериментів (ПФЕ) та моделювання за методом скінчених елементів (МСЕ), а також з використанням даних застосування штучних нейронних мереж.

Наукова новизна отриманих результатів.

Розроблена методика проектування операцій лазерної обробки (поверхневого гартування та газолазерного розрізання листів) зворотнім рішенням задачі теплопровідності за допомогою МСЕ. Виконані обчислювальні експерименти із створення сумарної похибки технологічних операцій та за їх аналізом визначені напрями внережимного вдосконалення процесів обробки з метою компенсації дії не врахованих при проектуванні показників. Розроблено нові засоби технологічного оснащення операцій, а також модернізовано відомі шляхом змінення принципів їх використання для досягнення нових ефектів.

Практичне значення отриманих результатів.

Розроблена методика визначення режимів обробки шляхом спрощення вихідного ТЗ виключенням критичних за очікуваними результатами показників при

рішенні багато критеріальних оптимізаційних задач. Показано шлях компенсації дії виключених показників не режимними методами за результатами аналізу якісних показників операцій. Створено приклади оснащення технологічних операцій обраних напрямів, за вперше визначеними результатами аналітичного структурування сумарної похибки операцій, причому для досягнення позитивних результатів знадобилося створення нових, а також виявилось можливим використання відомих рішень, але зі зміною умов їх функціонування.

Особистий внесок магістранта. Магістрантом виконано особисто аналіз відомих методів прогнозування та проектування операцій лазерної обробки з часу виникнення технології лазерної обробки, тобто майже за 50 років в межах найбільш розвинутих країн (СРСР, USA, Японія, ФРН та Великобританія) та оцінена можливість їх застосування в практиці проектування операцій. Критерії застосованості обрано магістрантом внаслідок порівняння результатів обчислювальних експериментів та даних їх практичної реалізації. Їм же було встановлена можливість використання відомих методик у обраних видах технологічних операцій. Магістрантом також виконано структурування сумарних похибок операцій за чинниками, відповідними за рівень найбільш вагомих їх складових, та обґрунтовано обрано напрями впливу на комплекс технологічних умов реалізації операцій (їх місця в технологічному процесі, технологічних схем виконання та розробку ТЗ на проектування оснащення).

Публікації та доповіді на конференціях.

По темі магістерської дисертації опубліковано 5 друкованих робіт, з них 1 статтю видано в спеціалізованому науковому виданні, затвердженому ДАК України та 2 патенти на корисну модель. Зроблено доповіді та опубліковані тези в матеріалах двох конференцій: *«Міжнародної науково-технічної конференції „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта”*, Секція *«Лазерна техніка та фізико-технічні технології»*, м. Київ, 29 червня 2017 НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». та *«Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню»*, Секція *«Лазерна техніка та фізико-технічні технології»*, м. Київ, 14 червня 2018.-Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».-

Структура дисертації. Дисертація складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 60 найменувань та додатків на 20 стор. Основний текст дисертації викладено на 80 стор. Повний обсяг становить 100 стор., 1 табл. та 27 рисунків.

1. Огляд методів проектування операцій лазерної обробки

Лазерним технологіям більше 50 років, проте, проектування технологічних операцій на етапі їх режимного забезпечення, за рідкісним виключенням, продовжує залишатися дослідницьким завданням, простим або складним залежно від виду операції, комплексності ТЗ, зокрема, від кількості її нормованих показників і рівня вимог до них. Враховуючи, що практично будь-який вид операції характеризується, принаймні, трьома показниками у вигляді розмірних і якісних результатів обробки, а також техніко-економічною її характеристикою (продуктивність, енергоємність, собівартість та ін.), то завдання проектування режимів завжди можна вважати багатокритерійним, і для пошуку оптимальних режимів її реалізації повинні використовуватися методи нелінійного програмування (наприклад, множників Лагранжа) або числові методи нелінійної оптимізації (наприклад, метод штрафних функцій) [1], для використання яких потрібно певні знання і навички. Також можуть використовуватися методи, засновані на перетворенні кожного з нормованих показників у безрозмірні функції відгуків з подальшим їх об'єднанням в єдиний показник [2], координати екстремального значення якого є рівнями керованих факторів процесу обробки і складають оптимальний технологічний регламент операції. Таким чином, необхідним етапом пошуку режиму обробки є моделювання процесу відносно усіх нормованих показників операції, що проектується. Складність методу моделювання визначається видом показника і комплексністю процесу, відповідального за досягнення технологічного результату. Так, *для розмірних показників операції* моделювання може виконуватися в результаті аналітичних і (або) експериментальних досліджень процесу обробки, і впродовж багаторічних розробок накопичено методичний досвід їх побудови і результати використання. *Техніко-економічні показники операцій*, що характеризують часові, матеріальні і ресурсні витрати, які визначаються їх технологічними схемами, описуються залежностями для визначення тієї складової операційного часу, впродовж якої працює **лазер**, тобто машинного часу $T_{\text{маш}}$, як найбільш витратний складовий елемент лазерної технологічної установки (ЛТУ) [3]. *Показники якості* (точність розмірних результатів, погрішності подовжньої і поперечної форми оброблюваних елементів виробу, їх розташування відносно базових поверхонь, а також шорсткість оброблених

поверхонь) є величинами, які тонше описують результати операції. Моделювання процесу відносно таких показників, як і розмірних результатів, можливо аналітичними і експериментальними методами, проте, практика таких досліджень обмежена [4, 5].

Що стосується залежності методик моделювання від складності процесу, відповідального за технологічний ефект, то найбільш поширені види операцій, як об'єкти досліджень, можуть бути поділені на три основні групи:

- операції *поверхневої теплової обробки* внаслідок нагріву заготовки лазерним променем, при виконанні яких практично відсутній масоперенос матеріалу із зони нагріву (поверхнева термообробка, об'ємне формоутворення, маркіровка) [6];
- операції *газолазерної обробки*, які характеризуються розділенням обов'язків між двома складовими інструменту: лазерний промінь забезпечує плавлення матеріалу (абляцію) в межах об'єму оброблюваного елемента; струмінь газу видаляє з останнього розплав, формуючи порожнину елемента (пазу, наскрізного різку, лунки, отвору) [6];
- операції *прецизійної (розмірної) обробки* з тепловим руйнуванням матеріалу його сублимацією при самостійному видаленні продуктів руйнування (ерозії) з порожнини оброблюваного елемента (пазу, різку, уступу, лунки, отвору) [7].

1.1. Методи моделювання процесів лазерної обробки

Виконаємо аналіз вдомих та застосовних методик моделювання процесу лазерної обробки відносно основних показників цих технологічних операцій.

Процедура моделювання процесу лазерної обробки, тобто встановлення кількісних прозв'язків між чинниками, що управляють станом об'єкту досліджень, і його вихідними показниками виконується для досягнення наступних цілей:

1. вивчення дії кожного з керованих чинників на стан об'єкту;
2. побудова рангових діаграм впливу чинників об'єкту, що управляють, для кожного з показників його стану;
3. формування узагальненого показника (функції) стану об'єкту в процедурі його багатокритерійної оптимізації;
4. використання в системах, що управляють станом об'єкту за одним або декількома показниками.

1.1.1. Аналітичні методи моделювання процесів лазерної обробки

моделювання процесу поверхневої теплової обробки в цілях формування узагальненого показника (п. 3) використовуються аналітичні (теоретичні) або експериментальні методики. Перші створюються в результаті аналізу фізичних (а також хімічних і механічних) явищ, відповідальних за створення технологічного ефекту, наприклад, при наближеному рішенні нелінійного диференціального рівняння теплопровідності. Це завдання є нелінійним завданням перенесення теплоти в твердому тілі, у якого від температури залежать поглинальна здатність поверхні заготовки (нелінійність II роду) і теплофізичні властивості її матеріалу : теплопровідність, теплоємність і його щільність (нелінійності I роду), що особливо проявляється для помірних енергетичних потоків (нагрівання і термічна обробка) [8], тобто при інтенсивності випромінювання на поверхні заготовки $I_p \leq 10^5$ Вт/см² (для металів). Аналітично нелінійні завдання з нелінійностями I і II роду вирішуються (приблизно) різними способами "лінеаризації": перетворенням Кирхгофа, підстановками Варшавського, Больцмана, Гудмана. Моделі, що отримуються при рішенні таких завдань, прогнозують лише *розмірні характеристики зон зміцнення* (ширину і глибину) для різних схем і характеру опромінення, що відрізняються видом теплового джерела, що створюється при опроміненні поверхні з різною швидкістю його переміщення. Автори стверджують про високу збіжність передбачених і експериментальних результатів (до 3-4%) [9]. Проте, для підвищення точності пророцтва розрахункові результати можуть уточнюватися поправочним коефіцієнтом, визначуваним розрахунковим шляхом [10]. Подальше підвищення точності розрахункових результатів досягнуте при рішенні рівняння теплопровідності числовими методами, наприклад, методом скінчених елементів (МСЕ), досягається при обліку нелінійностей I і II роду, тобто температурних змін теплофізичних властивостей матеріалу заготовки і поглинальних властивостей поверхні заготовки. Причому, достатній рівень правдивості досягається при представленні цих залежностей у вигляді функцій, наприклад, поліномами третьої степені, оскільки будь-який вид лінеаризації температурних залежностей призводить до істотних помилок пророцтв: при їх середньо інтегральних значеннях результати

істотно завищені, а при їх початкових значеннях - занижені [11]. Основним недоліком числових методів моделювання є відсутність моделі в явному виді, що ускладнює її використання при рішенні багатокритерійних оптимізаційних завдань. Крім того, цей вид моделювання не може бути використаним для показників більш високого порядку (точності розмірних показників, похибок форми оброблювального елемента, шорстості його поверхонь).

Процес газолазерного руйнування та видалення матеріалу, наприклад, використовуваний при розрізанні листової заготовки виконується складним (складеним) інструментом, тому для режимного забезпечення технологічної операції необхідно не лише вирішити теплове завдання нагрівання і плавлення матеріалу, але і газу: визначити параметри газового струменя, тобто погоджувати його розміри і форму з параметрами розплавленої зони матеріалу, динаміку руху, енергетичні характеристики шляхом вибору типу сопла, розрахунку його розмірних характеристик і положення відносно заготівлі. Переважним є рішення цих завдань за допомогою числових методів і об'єднання в єдиний програмний продукт [12].

При рішенні прямої газової задачі при моделюванні процесу ривняння, необхідні для визначення параметрів газового струменя, засновані на загальних рівняннях газової динаміки [13], зокрема, рівнянні Ейлера, рівнянні балансу енергії при адіабатичному русі ідеального і досконалого газу, рівнянні нерозривності (закон збереження маси) при його постійній течії, рівняннях збільшення кінетичної, потенційної і внутрішньої енергії, збільшення енергії одиниці маси газу, на рівнянні Бернуллі (механічної форми рівняння енергії). Початковими величинами при цьому є параметри сопла : його тип, розміри і розташування, а також склад газу, його тиск і швидкість на вхідному отворі сопла. При *проектванні режимів* необхідне вирішення зворотного завдання - ці параметри стають шуканими з умови збігу розмірів і форми струменя на його початковій ділянці з профілем наскрізної зони розплаву в листовій заготівці.

При дослідженні явищ, відповідальних за формування розмірного елемента в тілі заготовки (отвору, лунки, пазу, різі) при тепловому руйнуванні її матеріалу із самостійним його видаленням, з метою пророцтва *розмірних результатів* технологічній операції уперше почалися спроби моделювання процесів лазерної обробки, починаючи з 1967 року. При цьому були враховані наступні фізичні

принципи для процесу руйнування матеріалу: теорія розмірності [14], закон збереження енергії в різних викладах [15], [16], [17], [18], а також з урахуванням кінетики утворення отвору лазерним променем (феноменологічні моделі) [19]. Були також спроби застосувати наближені методи аналітичного рішення рівняння теплопровідності для пророцтва розмірних результатів обробки отвору (лунки) шляхом визначення меж ізотерм випару матеріалу в тілі заготовки [20]. Деякі дослідники використали досвід побудови емпіричних моделей в технології механообробки шляхом об'єднання одновимірних експериментальних залежностей у вигляді степеневих функцій [21]. За рідкісним виключенням ([18], [19]) усі моделі характеризуються низькою точністю пророцтва результатів обробки (погрішність досягає 200%) внаслідок істотно спрощеного уявлення про механізм формоутворення оброблюваного елемента. Наприклад, не враховуються температурні залежності рівня поглинання енергії випромінювання і теплофізичних характеристик матеріалу заготовки, пічковий характер подання енергії в структурі імпульсу, умови опромінення (положення заготовки в каустиці променя), присутність в ерозійному факелі матеріалу в твердій і рідкій фазах і так далі. На рис. 1 зображено результати обчислювальних експериментів за деякими з цих моделей. Видно суттєву різницю в їх результатах, що свідочує про розбіжність в прогнозуванні величин розмірних показників операції, причому вона зростає при інтенсифікації умов опромінення (W_p).

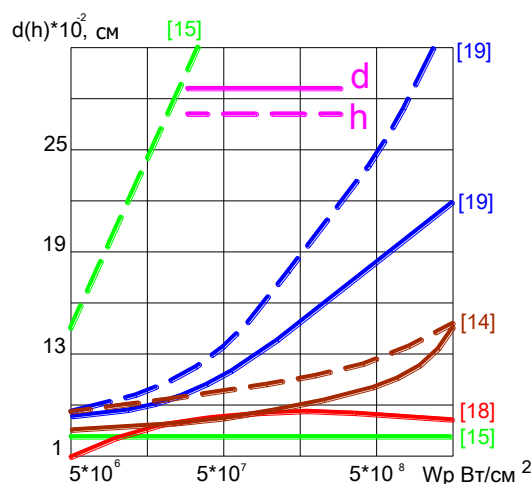


Рис. 1. Результати обчислювальних експериментів за моделями [14, 15, 18, 19] в умовах: матеріал заготовки Д16Т, тривалість імпульсу $5 \cdot 10^{-4}$ с, радіус отвору $5 \cdot 10^{-3}$ см, кут каустики $32,6^\circ$

Таким чином, більшість з відомих моделей може використовуватися лише для оціночних прогнозних розрахунків можливостей операцій лазерної розмірної обробки в умовах обраного комплексу керуємих чинників (імпульсної енергії E ,

тривалості імпульсу τ , кута розбіжності променя θ та інших). Цьому відповідає і форма їх представлення $d(h) = f(E, \tau, \theta...)$, що виключає їх використання для вирішення зворотної задачі – проектування. Одинока спроба використання приближних аналітичних рішень рівняння теплопровідності або чисельного моделювання за МСЕ [20] не дала позитивних результатів внаслідок складності кількісного врахування масопереносу.

При моделюванні технологічних операцій відносно *показників якості операцій* використовуються аналітичні моделі, побудовані на принципі суперпозиції для формування сумарної погрішності обробки з її складових, що вносяться учасниками технологічної оброблювальної системи (ТОС). Для реалізації цього принципу ТОС представляється у вигляді перетворюючої системи, на вхід якої поступають нестабільності її учасників (інструменту, заготовки і технологічного устаткування), а також помилки використаних прийомів, а виходом є результат їх дії на формований елемент заготовки, що представляється у вигляді лінійної (чи лінеаризованою) комбінації перетворених в ТОС початкових нестабільностей. Залежні від технологічного регламенту операції і характеристик устаткування початкові нестабільності і коефіцієнти їх трансформації в перетворюючій системі визначаються в результаті аналізу роботи устаткування і особливостей технологічної схеми операції. Дані прогнозних розрахунків сумарної погрішності операцій контурного вирізування виробів з листа [5], а також прошивки отворів [22, 23] близькі до експериментальних результатів: погрішність ширини реза $\Delta b = 48$ мкм близька до дійсної величини її поля розсіяння $6Sb = 66$ мкм для вирізування при імпульсному поданні енергії і $\Delta b = 187,2$ мкм до величини $6Sb = 183,0$ мкм - в операції з безперервним опроміненням [4]; а погрішність діаметру отворів $\Delta d = 45,5 \pm 15,7$ мкм порівнянна з $6Sd = 51,6$ мкм [23]), відповідно. Операції поверхневого зміцнення найменш досліджені як на точність елементарних зон зміцнення (їх поперечних Δb (Δd) і подовжніх розмірів Δz), так і розмірних характеристик зміцненої поверхні заготівлі (ΔB і ΔZ), ймовірно, внаслідок зазвичай низьких вимог до їх відтворюваності. Проте, цим показником навряд чи варто нехтувати внаслідок небезпеки виникнення на зміцненій поверхні заготовки зон низької твердості із-за пропусків в схемі її покриття при варіаціях діаметру і глибини одиничних зон чи явищ відпущення при багатократному накладенні один на одного теплових джерел з

температурою, меншою, ніж 723° (для сталей) [25]. В останній час для операцій поверхневого зміцнення, результати яких найбільш передбачувані внаслідок відносної простоти набору явищ, відповідальних за технологічний ефект, була досліджена можливість використання штучної нейронної мережі (ШНМ) для пророцтва сумарної погрішності операції загартування при імпульсному (безперервному) опроміненні і її навчання (управління синапсними коефіцієнтами) для зменшення предикта до нормованого його рівня [26].

Вид аналітичних моделей якості (лінійний поліном Тейлора) дозволяє їх використати в завданнях непрямой оптимізації для створення функціоналів нев'язки сумарної погрішності однієї або декількох її складових для включення у функцію мети, накладаючи додаткові умови на вибір технологічного регламенту операції.

1.1.2. Експериментальні методи дослідження процесу лазерної обробки.

Виконуються за різними методиками залежно від мети процедури: побудова фізичних моделей процесу, тобто виявлення приватних залежностей його показників від кожного з керованих чинників або моделювання поведінки досліджуваного об'єкту від комплексного впливу усієї їх сукупності, включаючи взаємодії. Переслідуючи першу мету експерименту, досягають задоволення пізнавального інтересу і віддають перевагу однофакторній стратегії збудження процесу по черзі кожним з чинників при фіксованих рівнях інших. З таких моделей дійсно можна встановити незалежний вплив кожного з чинників для супутнього набору рівнів інших, що може згодиться для їх використання в системах автоматизованого управління процесом, проте, виникає деяка невпевненість такого управління внаслідок невизначеної реакції будь-якого з інших чинників на зміну рівня, керованого в цій обстановці. Спроби об'єднання одновимірних залежностей в узагальнювальну модель процесу призводять до створення конгломератів [21], що приблизно описують процес.

Прикладний характер моделювання, необхідний для забезпечення режимного управління процесом без акцентування уваги на подробиці його фізичної (чи хімічної) суті, має більшу цінність для технологічного забезпечення операцій. Метод "чорного ящика"(кібернетичний) припускає одночасно багатофакторне обурення об'єкту за певною схемою з фіксацією його реакції за вибраними показниками. В

результаті відповідної обробки експериментальних даних на тлі прийнятого порядку (плану) експерименту вдається зв'язати рівні показників, що характеризують процес, з рівнями чинників, що управляють, тобто змоделювати процес. З часу перших застосувань багатофакторного планування експерименту зусиллями ряду математиків були розроблені принципи "Теорії експерименту", в якій проаналізовані можливості і особливості безлічі типів експериментальних планів, оптимальних за різними оцінками. Практика використання планів дозволяє рекомендувати деякі з них для різних творчих ситуацій таких, як моделювання нових за змістом процесів (плани 1 і 2); зміна меж факторного простору або набору показників дослідженого раніше процесу (плани 2 і 3); уточнення моделей у зв'язку з дрейфом режиму роботи лазера ЛТУ або на етапі перед планування експерименту (табл. 1). У останній прийнятій наступні позначення: $L_{л}$ - кількість членів лінійної моделі ($L_{кв}$ - для квадратичної); n - кількість чинників, що змінюються в експерименті; B_k - план Бокса на кубі; H_c - план Хартлі на сфері; H_c кв. D - квазі D - оптимальний план на сфері; Рехтш. - насичений план Рехтшафнера.

Хоча такий вид моделювання процесу може застосовуватися для усіх даних операцій, він ефективний для їх показників більш високого порядку (наприклад, якості), ніж розмірні і техніко-економічні характеристики, а також для усіх показників операцій прецизійної обробки.

Таблиця 1. Перелік експериментальних планів для різних завдань(етапів) моделювання

№ пп	Модель. Кількість ефектів. План Кількість іспитів	Кількість факторів n						
		2	3	4	5	6	7	8
1	Лінійна, $L_{л} = 1+n +0,5n(n-1)$	4	7	11	16	22	29	37
	Тип плану [2]	2^2	2^3	2^4	2^{5-1}	2^{6-1}	2^{7-2}	2^{8-2}
	Кількість іспитів	4	8	16	16	32	32	64
2	Квадратична $L_{кв} = 0,5(n+2)(n+2)$	6	10	15	21	28	36	45
	Тип плану (композиційний) [2]	B_k	B_k	B_k	B_k	B_k, H_c	B_k	B_k
	Кількість іспитів	8	14	24	26	44	48	80
3	Квадратична $L_{кв} = 0,5(n+2)(n+1)$	6	10	15	21	28	36	45
	Тип плану (насичений) [2]	$H_{cквD}$	$H_{cквD}$	Рехтш.	Рехтш.	Рехтш.	Рехтш.	Рехтш.
	Кількість іспитів	6	10	15	21	28	36	45
4	Лінійна (квадратична) $(n+1) \leq L \leq 0,5(n+2)(n+1)$	3-6	4-10	5-15	6-21	7-29	8-37	9-46
	Тип плану (компромисний) №пл. [27]	41	45	46	56	52	31	32
	Кількість іспитів	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$	$\geq L$

Математичні моделі процесу, отримані по будь-якому з перелічених вище методів і що мають вигляд лінійної або нелінійної функції показника стану об'єкту від поєднання рівнів його керованих чинників, по своєму виду і можливостям є предикторами стану об'єкту. Їх використання для формування комплексу умов

певного стану об'єкту ускладнене тим, що модель є функцією з багатьма невідомими, що має безліч рішень, і застосування в процедурі режимного забезпечення технологічної операції з однокритерійною оцінкою її результату неефективне і недоцільне.

Таким чином, на основі виконаного огляду методів моделювання процесу лазерної обробки незалежно від складності досягнення її результатів можна стверджувати, що повноцінне проектування режимного регламенту технологічної операції з урахуванням усіх вимог ТЗ може бути виконане у вигляді рішення багатокритерійної оптимізаційної задачі з використанням моделей, одержаних аналітичними методами для деяких її показників та в результаті експериментального моделювання відносно показників більш високого порядку. Такий алгоритм має *переваги* та *недоліки*. Перші пов'язані з можливістю витримання усіх вимог ТЗ за умови використання обох видів моделювання. *Недоліки* викликані складністю обох процедур та їх тривалістю [28]. Це викликає *проблеми про проектуванні* технологічних операцій усіх видів, які зростають при підвищенні вимог до останніх.

Враховуючи, що основними споживачами лазерної технології залишилися невеликі приватні підприємства та деякі держпідприємства, які обмежені в можливостях режимного забезпечення операцій лазерної обробки тим, чи іншим шляхом, нам здається *актуальною* розробка інформаційного, програмного та технічного забезпечення процедури проектування за спрощеним алгоритмом без втрати її якості [29].

Мета роботи полягає у створенні інформаційного та програмного забезпечення процедури проектування технологічних операцій лазерної обробки за спрощеним алгоритмом без втрати її якості.

Для досягнення мети необхідно вирішити **наступні задачі**:

- проаналізувати сучасні методи проектування операцій лазерної обробки (поверхневого гартування, контурного газолазерного розрізання листового матеріалу та прецизійної обробки) та визначити для кожної з них придатність моделей для використання та глибину їх опису процесу обробки;
- виконати аналіз керованості процесом обробки, в першу чергу, якісними її показниками, факторами, які складають їх відповідні моделі;

- дослідити ступінь впливу керуємих факторів на складові сумарної похибки розмірних результатів технологічних операцій та ступінь їх керованості можливостями лазерної техніки;
- розробити засоби та способи нережимного впливу на якість технологічних операцій відповідно до результатів аналізу сумарної похибки їх розмірних результатів.

2. Режимне забезпечення технологічних операцій лазерної обробки

Завдання проектування технологічного регламенту операції полягає в тому, щоб за заданими в ТЗ або кресленні критеріями на показники стану об'єкту вибрати відповідні рівні чинників, що управляють об'єктом. Очевидно, що ускладнення завдання збільшенням кількості нормованих показників призводить до зменшення кількості допустимих станів об'єкту, тобто, до утруднень пошуку їх координат у факторному просторі. Особливо це стосується випадків підвищення вимог до показників якості процесу, оскільки аналітичне моделювання останнього відносно цих показників є складною процедурою, наприклад, [26] та тривалою [28].

2.1. Операції поверхневої термообробки

Для проектування режиму обробки *операції поверхневого гартування* в результаті нагрівання поверхневого шару заготовки лазерним променем можна використати розрахунковий метод, заснований на нелінійному програмуванні з використанням як рівняння зв'язку зворотного рішення тривимірного рівняння теплопровідності, виконаного за МСЕ.

Для виконання технологічного завдання - формування в тілі заготовки загартованої зони заданої форми і розмірів з нормованим рівнем твердості - ТЗ на проектування операції повинно містити наступні дані:

- - креслення заготовки з вказівкою розмірних меж і профілю зони загартування :

$$F_3(X, Y, Z);$$

- - рівні температур структурних перетворень: рівноважної A_{C3} і величини температурного інтервалу ΔT , в межах якого повинен знаходитися матеріал зони загартування під час обробки :

$$A_{C3} \leq T \leq A_{C3} + \Delta T \quad (1)$$

- критичні значення швидкостей охолодження матеріалу в зоні загартування V_{Omax} і V_{Omin} :

$$V_{Omin} \leq \partial T / \partial t \leq V_{Omax} \quad (2)$$

- граничні умови, які описують максимальний (мінімальний) рівень температури на характерних поверхнях заготовки:

$$T_{max}(X, Y, Z, t) \left| \begin{array}{l} X = 0 \\ Y = 0 \\ Z = 0 \end{array} \right. \leq T_{nl}; \text{ или } T_{nl} \leq T_{max}(X, Y, Z, t) \left| \begin{array}{l} X = 0 \\ Y = 0 \\ Z = 0 \end{array} \right. \leq T_0. \quad (3)$$

Для виконання вимог ТЗ до якісних і розмірних результатів обробки необхідно визначити комплекс керованих чинників процесу: тимчасові, просторові і енергетичні характеристики теплового джерела, створеного в результаті опромінення, його положення і закон відносного переміщення. Властивості теплового джерела визначаються комплексним параметром променя (інтенсивністю випромінювання), який залежить від ряду характеристик променя, тому режим обробки включає:

- для безперервного режиму опромінення: потужність випромінювання P , розподіл інтенсивності в поперечному перерізі променя, його розмір на поверхні заготовки d_0 і швидкість їх відносного переміщення (подачі) V ;
- для ЛТУ з імпульсним режимом роботи: енергію в імпульсі випромінювання E і його тривалість τ , частоту дотримання імпульсів f і розміри променя на поверхні заготовки d_0 , розподіл інтенсивності в перерізі променя, швидкість відносного переміщення V при багато імпульсному опроміненні або крок відносного зміщення S у випадку одно імпульсного режиму обробки.

В якості прикладу розглянемо етапи проектування операції загартування прохідного різця по передній його поверхні (рис. 2а). Аналіз ескізу виробу дозволяє сформулювати наступні умови проектування:

- заготовка - усічений під кутами φ і φ_1 з боку одного з торців паралелепіпед з сформованим різальним клином (кути γ , α і β), з площею поперечного перерізу $a \times b$ з інструментального матеріалу;
- поверхня різця, що піддається опроміненню - передня, остаточно оброблена до шорсткості R_a (без покриття);
- просторова форма загартованого шару - усічений паралелепіпед завтовшки Z_3 , шириною X_3 і завдовжки, рівній довжині різальної кромки $Y_3 = l$.
- твердість матеріалу заготовки в межах зони загартування $H\mu = 8750 \pm 50$ МПа.

В умовах заданої глибини зони загартування Z_3 і початкової шорсткості передньої поверхні різця R_a повинна бути виключена можливість її оплавлення, а зважаючи на специфіку відведення тепла з боку задньої поверхні різального клину з

кутом нахилу α , обґрунтовано можна вважати необхідним виконання операції з нормованим поданням енергії у вигляді окремих імпульсів. Це дозволяє уточнити вид моделі і граничні умови її роботи:

$$\frac{\partial}{\partial X} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial X} \right) + \frac{\partial}{\partial Y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial Y} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial Z} \right) = c(T) \rho(T) \left(\frac{\partial T}{\partial t} - V \frac{\partial T}{\partial X} \right) \quad (4)$$

$$\text{а) } E \leq E_{max}$$

$$\text{б) } \tau_{min} \leq \tau \leq \tau_{max}$$

$$\text{в) } V_{Omin} \leq V_O \leq V_{Omax} \quad (5)$$

$$\text{г) } I_{Pmin} \leq I_P \leq I_{Pmax},$$

де: λ , c , ρ - теплопровідність, питома теплоємність і щільність матеріалу; а) і б) енергетичні і часові обмеження відповідно; г) - обмеження на інтенсивність пучка випромінювання I_P .

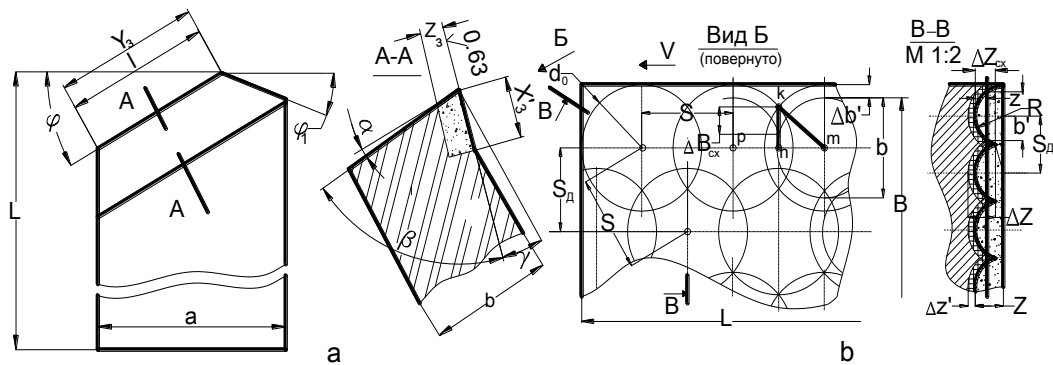


Рис. 2. Ескиз різцу (а) та схема формування загартованого шару (б).

Для виконання норми ТЗ, що стосується поперечної форми зони загартування із заданими розмірами (X_3 і Z_3), функція мети повинна містити умови її формування:

$$RSQ = [T(X, Y, Z) - F(X, Y, Z)]^2 = \text{мінімум} \quad (6)$$

Для формування зони загартування із заданим профілем перерізу необхідно доповнити систему граничних умов (5) параметром, який визначає розподіл інтенсивності в промені на поверхні заготовки. Якщо його описати залежністю:

$$I_P(X, Z, t) = W_P(X, Z, t) / A = P(t) \hat{W}_P(X, Z) / A, \quad (7)$$

(де: $\hat{W}_P(X, Z)$ - постійний нормований розподіл густини потужності теплового джерела, наприклад, нормальний, рівномірний або інший, A - коефіцієнт поглинання поверхнею заготовки променистої енергії використуваної довжини хвилі), то в результаті рішення рівняння зв'язку (4) із відповідними граничними умовами (5) можна визначити розміри променя і положення граничних точок нормованого розподілу $\hat{W}_P(X, Z)$ на опромінюваній поверхні:

$$\frac{E}{W_{E_{max}}} \left(\frac{P}{AI_{P_{max}}} \right) \leq \frac{E}{W_E} \left(\frac{P}{AI_P} \right) \leq \frac{E}{W_{E_{min}}} \left(\frac{P}{AI_{P_{min}}} \right) \quad (8)$$

У разі використання розподілу інтенсивності в перерізі променя в якості одного з параметрів оптимізації необхідно перейти від нормованого (умовного) розподілу до реального, описуючи його залежністю:

$$P(t) = \int_{Z_{min}}^{Z_{max}} \int_{X_{min}}^{X_{max}} AI_P(X, Z, t) dx dz$$

яка дає можливість порівнювати промені однакових розмірів і потужності, але з різним нормованим розподілом $\hat{W}_P(X, Z)$. Приклади профілів променів, які відповідають цим вимогам, наведені на рис. 3.

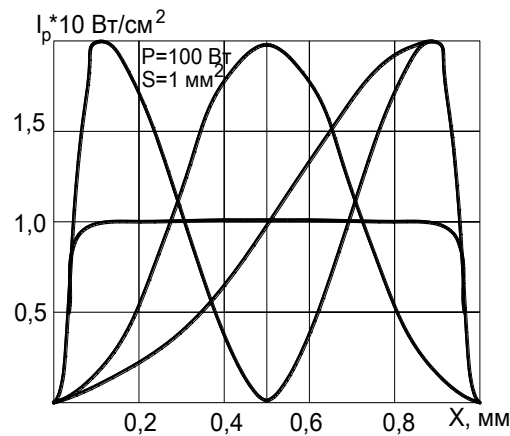


Рис. 3. Приклади профілів розподілу інтенсивності в промені

Пошук режимів обробки (параметрів лазерного променя і умов опромінення)

здійснюється шляхом відбудування енергетичного потоку випромінювання на опромінюваній поверхні за заданому положенню та форми ізотерми загартування в тілі заготовки, при використанні в якості зв'язку числового рішення рівняння теплопровідності типу (4) з граничними умовами (5):

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda(T) \frac{dT}{dZ} \Big|_{Z=0} = -A(T) W_{Po} \exp[-k(X^2 + Y^2)] \\ T(\pm \infty; Y; Z; t) = T(X; \pm \infty; Z; t) = T(X; Y; \pm \infty; t) = T(X; Y; Z; 0) = T_0 \end{array} \right. , \quad (10)$$

де: $T(X; Y; Z; t)$ – температура; t – час; X, Y, Z - просторові координати; W_{Po} - густина потужності теплового джерела, створеного поглиненою частиною енергії променя; k - коефіцієнт зосередженості теплового джерела; $A(T)$ - температурна залежність коефіцієнта поглинання випромінювання поверхнею заготівлі.

У зв'язку з тим, що рівняння зв'язку враховує обмеження (1 - 3 і 5) в неявній формі, при цьому вирішується завдання непрямої оптимізації (пошуку екстремуму

функції б)), використовується один з методів прямого пошуку - метод Хука – Дживса (метод многогранника, що деформується).

Для кількісної оцінки результатів проектування виконаємо режимне забезпечення операції загартування різального клину автоматного прохідного різця із сталі У8 (рис. 2а) наступних розмірів: $\gamma = 10^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\beta = 70^\circ$; $a \times b = 14 \times 10$ мм; глибина $Z_3 = 0,15$ мм, ширина $X_3 = 2,25$ мм (у перерізі А - А рис. 2а); довжина одиничної зони $Y_{3l} = X_3 = 2,5$ мм і загальна довжина $Y_3 = l = 12$ мм. Твердість матеріалу в межах зони загартування $H\mu = 8750 \pm 50$ МПа. На підставі початкових даних формується комплекс граничних умов згідно (1 - 3) і (5):

- умови реалізації структурних перетворень в межах зони загартування:

$$730^\circ C \leq T_V(X, Y, Z, t) \leq 811^\circ C (\Delta T = 81^\circ C)$$

- умови збереження незмінного стану шорсткості опромінюваної поверхні ($R_a = 0,63$ мкм), без її оплавлення:

$$T_{max}(X, Y, Z, t) \begin{cases} X = 0 \\ Y = 0 \\ Z = 0 \end{cases} \leq 1500^\circ C \leq T_{nl}$$

- обмеження на параметри пучка випромінювання, які визначаються можливістю вибраного технологічного устаткування :

$$E \leq 8 \text{ Дж}; 2 \cdot 10^{-3} \text{ з} \leq \tau \leq 8 \cdot 10^{-3} \text{ с}; 1 \text{ Гц} \leq f \leq 100 \text{ Гц}; 0,4 \text{ Дж/мм}^2 \leq W_E \leq 3,0 \text{ Дж/мм}^2; 1,3 \text{ мм} \leq d_0 \leq 3,6 \text{ мм}$$

У роботі використано технологічне устаткування TruPulse 21 [30] і Квант-15 з наступними технічними характеристиками (після модернізації):

- розміри активного середовища YAG: Nd^{+3} : $d \times l = 6 \times 130$ мм;
- імпульсна енергія випромінювання: $E \in 0,1 \div 10$ Дж;
- тривалість імпульсу: $\tau \in 50 \div 8000$ мкс;
- кут розбіжності лазерного променя: $\theta \in 0,003 \div 0,006$ рад.;
- частота подачі імпульсів: $f \in 1 \div 100$ Гц;
- телескоп: (афокальний) – збільшення: $\Gamma = 2$ та 4 рази;
- набір перетворюючих лінз з фокусною відстанню: $F = 25, 50, 75$ і 100 мм.

При формуванні функції мети на конфігурацію зони загартування накладається штраф (6), перетворений для зони, отриманій при дії одного імпульсу, тобто $Y_3 = X_3$:

$$RSQ_1 = [T(X, Y, Z) - F(X_3, Y_3)]^2 = \text{мінімум}, \quad (11)$$

а також на швидкість термічних циклів (нагрівання та охолодження зони):

$$RSQ_2 = [\partial T / \partial t - V_{min}]^2 = \text{мінімум}. \quad (12)$$

Для скорочення тривалості розрахунків, а також у зв'язку з осьовою симетрією завдання у напрямі Y і X (у напрямі від кромки різального клину) процес нагрівання описується двовимірним рівнянням теплопровідності (10). Залежності $c_p(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$, і $A(T)$ [31], а також $P(X, Y)$ інтерполюються кубічними сплайнами.

Для часової форми імпульсу вибраної ЛТУ (рис. 4), а також при допуску на приріст функції і аргументу 10^{-4} розрахункові рівні чинників, представляються у вигляді аргументів:

- x_1 - тривалість імпульсу $\tau = 6,10^{-3}$ с;
- x_2 - координата лівої межі теплового джерела $x_{min} = 0,01$ мм;
- x_3 - нормована густина енергії $\hat{W}_E = 2,4$ мм⁻²;
- $x_4 \dots x_{4+N}$ - ординати оптимального розподілу інтенсивності в перерізі променя уздовж координати X (нормований розподіл приведено на рис. 5) (N - кількість точок інтерполяції);
- x_{10} - діаметр променя на поверхні заготовки - $d_0 = 1,8$ мм;
- x_{11} - крок переміщення заготовки (променя) $S_L = 0,8$ мм (коефіцієнт перекриття $k_{II} = S_L/d_0 = 0,44$);
- x_{12} - швидкість переміщення $V = 8$ мм/с (при частоті подання імпульсів $f = 10$ Гц);
- x_{14} - імпульсна енергія $E = 6,1$ Дж.

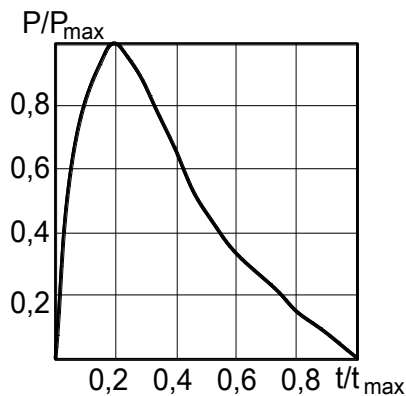


Рис. 4. Часова форма імпульсу випромінювання ($\tau = 6 \cdot 10^{-3}$ с, $E = 6,1$ Дж).

Значення інших параметрів обробки встановлені, виходячи з характеристик можливостей використовуваної технологічної установки. Так, наприклад, для технологічної установки на базі лазера TruPulse 21 ($P_{cp} = 20$ Вт, $P_{im} = 1,5$ кВт, $E_{max} = 15$ Дж, $\tau \in 0,2 \div 50$ мс, ВРР = 4 мм×мрад [30]), з діаметром променя $D = 6,0$ мм, кутом його розбіжності $\theta = 4$ мрад і збільшенні телескопа $\Gamma = 2$ при роботі з лінзою з фокусною відстанню $F = 50$ мм для формування зони опромінення діаметром $d_0 = 1,8$ мм телескоп необхідно розладнати зміщенням його позитивної компоненти на +2 мм

і розмістити опромінювану поверхню заготовки зі зміщенням $\Delta F = - 5,9$ мм від горловини каустики променя.

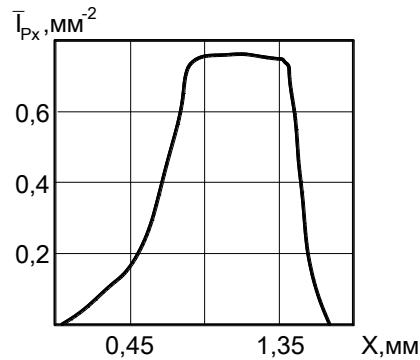


Рис. 5. Нормований розподіл інтенсивності в перерізі лазерного променя в зоні опромінення.

Прогнозні значення розмірів зони загартування при обраних режимах:

- x_{13} - розміри зони загартування: $X_3' = 2,25$ мм, $Z_3' = 0,158$ мм; $Y_3 = 12,0$ мм.
- x_{15} - поверхнева продуктивність операції $V \times X_3' = 18,0$ мм²/с, її тривалість 1,5 с.

Експериментальна перевірка вибраних режимів обробки показала досить високу міру збіжності розмірних показників зони загартування з розрахунковими їх значеннями: $X_{3e} = 2,30$ мм (розрахункове значення 2,25), $Z_{3e} = 0,145 \div 0,159$ мм (0,158), $Y_{3e} = 12,5$ мм (12,0).

Завдання проектування виконано відносно набору даних, зображених на ескізі виробу (рис. 2а), проте, реалізація вибраної схеми покриття передньої поверхні різального клину суперпозицією поодиноких загартованих зон (рис. 2б) призводить до появи нестабільності ширини і глибини загартованого шару ΔB_{cx} і ΔZ_{cx} при природних погрішностях формування поодиноких зон Δb і Δz від нестабільностей, що вносяться учасниками ТОС. У разі високих вимог до рівномірності загартованого шару, наприклад, при обробці тонкостінних заготовок на функцію мети треба накласти додаткові штрафи, що стосуються мінімізації погрішності глибини і ширини зони загартування.

2.2. Операції розкроювання листових заготовок газолазерним розрізанням

Особливістю процесу газолазерної обробки є використання двох видів енергетичної дії на матеріал заготовок. Лазерний промінь забезпечує теплову дію з метою порушення його сплоснності, тобто створення умов для механічного видалення розплаву найбільш ефективним видом дії - газовим струменем. Хоча таке розділень функцій спрощує управління процесом розмірного видалення матеріалу, етап проектування режимів обробки ускладнюється, оскільки необхідно враховувати

взаємний вплив складових інструменту, зокрема, видалення матеріалу з порожнини різку, що порушує баланс теплової енергії і не сприяє обліку витрати кінетичної енергії струменя газу.

Комплексність інструменту для газолазерного різання ускладнює завдання проектування технологічної операції, яке необхідно виконувати в два етапи :

- вибір параметрів променя, умов його перетворення оптичною системою, та швидкості переміщення відносно заготовки, виходячи із завдання формування в її тілі зони розплаву, розміри і форма якої відповідають формі різку;
- проектування системи подачі технологічного газу (тип, тиск, форма, розміри і розташування сопла відносно заготовки) у вигляді струменя, енергетичні розміри і форма якого визначаються розмірами зони розплаву в ній, причому необхідно враховувати деякі гідродинамічні властивості матеріалу заготовки в рідкому стані: рідкотекучість, в'язкість і ін.

Операції контурного газолазерного різання можна розглядати як однокритерійні, тобто які оцінюються за одним з головних технологічних показників операції розрізання - за шириною різку. Інші вимоги, що пред'являються до якості різку, виконуються за рахунок додаткових засобів дії на процес обробки, а основний техніко-економічний показник - продуктивність операції - забезпечується максимізацією швидкості різання при виборі режиму обробки. У таких випадках разом з використанням аналітичних моделей, отриманих в результаті наближених рішень рівняння теплопровідності, і феноменологічних моделей, розроблених для розрізання імпульсно-періодичним і безперервним випромінюванням [12], застосовуються математичні (емпіричні) моделі, отримані експериментальними методами [32].

Аналізуючи можливості проектування з використанням цих моделей, можна зробити висновок про те, що вони володіють рядом недоліків, які істотно впливають на якісну і кількісну сторону рішення не оптимізаційних завдань проектування операцій газолазерного різання, перші моделі - внаслідок низької точності опису процесу руйнування та виносу матеріалу із зони обробки, що викликається вимушеними спрощеннями рівняння теплопровідності при його аналітичних рішеннях, та другі (експериментальні) - внаслідок трудомісткості отримання і істотних обмежень при використанні.

Для більш коректного вирішення теплової задачі необхідно описати процес нагрівання і плавлення матеріалу заготовки математичною моделлю в тепловій постановці – внаслідок числового рішення нелінійного диференціального рівняння теплопровідності (13) для кожної з двох фаз, з урахуванням фазових переходів [33]:

$$[c(T)\rho(T) + H\delta(T - T^*)] \frac{\partial T}{\partial t} = \sum_{i=1}^3 \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda_i(T) \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + f \quad (13)$$

$$T_{x_i,0} = T_n = Const > 0$$

$$\begin{aligned} -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ x_1, x_2 \in \text{зона.реза} \\ x_1, x_2 \notin \text{зона.возд.ЛЛ}}} &= A(T)I_p; \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ x_1, x_2 \notin \text{зона.реза} \\ x_1, x_2 \notin \text{зона.возд.ЛЛ}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=0 \\ x_1, x_2 \in \text{зона.реза} \\ x_1, x_2 \notin \text{зона.возд.ЛЛ}}} &= 0; \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=h \\ x_1, x_2 \notin \text{зона.реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_3} \Big|_{\substack{x_3=h \\ x_1, x_2 \in \text{зона.реза}}} &= 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=0 \\ x_1, x_3 \in \text{зона.реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=0 \\ x_1, x_3 \notin \text{зона.реза}}} &= 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=l_2 \\ x_1, x_3 \in \text{зона.реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=l_2 \\ x_1, x_3 \notin \text{зона.реза}}} &= 0, \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=0 \\ x_1, x_3 \in \text{зона.реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=0 \\ x_1, x_3 \notin \text{зона.реза}}} &= 0; \\ -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=l_1 \\ x_1, x_3 \in \text{зона.реза}}} &= \alpha(T)(T_{oc} - T); \quad -\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x_2} \Big|_{\substack{x_2=l_1 \\ x_1, x_3 \notin \text{зона.реза}}} &= 0; \end{aligned} \quad (14)$$

де: T_{oc} - температура довкілля; $c_p(T)$, $\rho(T)$, $\lambda(T)$ і $\alpha(T)$ - температурні залежності питомої теплоємності, щільності, теплопровідності і тепловіддачі матеріалу заготовки; f - внутрішнє теплове джерело (приймається рівним 0); x_i ($i = 3$) - координати тривимірного простору; $\delta(\xi)$ - дельта функція Дираку ($\xi = (T - T^*)/T^*$; T^* - температура фазового переходу); H - ентальпія фазового переходу).

У зв'язку з тим, що точного аналітичного рішення нелінійного диференціального рівняння теплопровідності (13) в довільній постановці не існує, для прогнозування результатів процесу лазерної обробки в режимі керованого плавлення матеріалу листової заготовки або для проектування на цій основі технологічної операції використовується його чисельне рішення. Найцікавіша локально-одновимірна схема рішення, яка є економічною. Але при використанні такої схеми виникають дві проблеми:

- в процесі газолазерної обробки відбувається видалення матеріалу із зони опромінення і визначення температури вузлових точок розрахункової сітки перестає бути об'єктивним;

- температурні залежності теплофізичних характеристик матеріалів відомі лише для малого діапазону температур.

Перша проблема вирішується в результаті заповнення осередку розрахункової сітки фіктивним матеріалом з певними теплофізичними і оптичними властивостями замість того, що видаляється. При рішенні таких завдань пропонується прийняти значення питомої теплоємності $c_p = 1$ Дж/кг*град і теплопровідності $\lambda = 10^5$ Вт/м*град. Цей прийом виключає необхідність перебудови сітки при використанні локально-одновимірних схем розрахунку, а також дозволяє враховувати перевипромінювання в зоні різання шляхом варіювання теплофізичних характеристик фіктивного матеріалу, а при імпульсному опроміненні - вплив ерозійного факела на параметри різу [32].

Проблему, пов'язану з недостатньою кількістю даних про температурні залежності теплофізичних характеристик оброблюваного матеріалу, можна вирішити за допомогою їх апроксимації кубічними сплайнами, причому необхідно враховувати те, що при фазовому переході, стрибок випробовує теплоємність, після чого вона, а також теплопровідність в досліджуваному діапазоні температур залишаються практично незмінними. Також можна вважати постійним рівень коефіцієнта поглинання матеріалу після досягнення температури поверхні рівня $300 \div 400^\circ\text{C}$.

Прямим рішенням теплової задачі прогнозуються результати опромінення у вигляді розмірів і форми різу при відомих властивостях лазерного променя (довжини хвилі випромінювання, потужності P і її розподілу в межах діаметру променя D , кута розбіжності θ), параметрах його перетворення (виду і характеристики оптичної системи) і умов опромінення (рис. 6). Відмінності в положеннях ізотерми сквозного плавлення заготовки ($t = 0,052$ с) та заданої ширини різу $b = 0,6$ мм пояснюється складністю пророцтва можливостей видалення розплаву струменем газу без його характеристик.

Для визначення комплексу параметрів лазерного променя, умов його перетворення і опромінення заготовки (тобто режиму обробки технологічної операції) необхідно здійснити відбудування енергетичного потоку випромінювання за обраним законом розподілу на опромінюваній поверхні по заданих положенню і формі ізотерми плавлення в тілі заготовки, при використанні як зв'язок чисельного рішення рівняння теплопровідності типу (13) з граничними умовами(14).

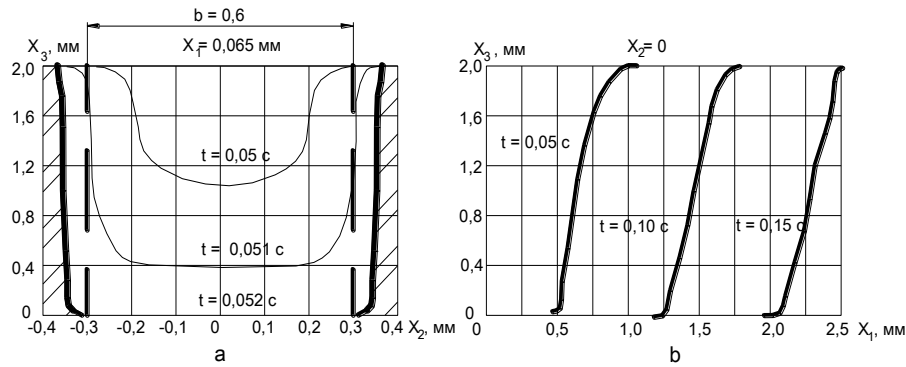


Рис. 6. Форма і межі зон плавлення (а - уперек, б - уздовж напрямку різання) в результаті опромінення випромінюванням CO_2 - лазера потужністю $P = 1500$ Вт з діаметром променя $d_0 = 0,5$ мм при швидкості подачі $V = 1$ м/хв. (— розрахункове положення ізотерм, - - задане).

Враховуючи допоміжну функцію газового струменя - видалення матеріалу з порожнини різки, сформованої межами його розмірного плавлення в результаті лазерного опромінення, для наближених розрахунків газового потоку через сопло можна задовольнятися спрощеною одновимірною стаціонарною моделлю [34]. Приймаючи вектор швидкості u в перерізі каналу сопла спрямованим уздовж осі, а її величину, а також тиску p , щільності ρ і температури T постійними в цьому перерізі каналу, розглядатимемо їх як величини, які змінюються від перерізу до перерізу останнього при заданому законі зміни площі перерізу сопла F уздовж осі. Газовий потік можна вважати адіабатичним, а газ досконалим і ідеальним. За цих умов рух газу можна вважати ізоентропійним.

Дифференціальне співвідношення між змінами швидкості газу і площі перерізу сопла можна отримати з рівняння Ейлера за умови нерозривності струменя:

$$(M^2 - 1) \frac{du}{u} = \frac{dF}{F} \quad (15)$$

де: M - число Маха, яке характеризує міру перетворення теплоємності газового потоку в кінетичну енергію і пов'язане із швидкістю потоку u залежністю:

$$u = u_3 \left\{ \left[(k+1)M^2 / 2 \right] / \left[1 + (k-1)M^2 / 2 \right] \right\}^{1/2}$$

де: (u_3 - швидкість звуку).

Якщо $M < 1$, знак du протилежний до знаку dF , тобто із зростанням площі перерізу сопла швидкість u падає, і, навпаки, при зменшенні перерізу - росте:

$$\frac{F}{F_{\text{ex}}} = \frac{M_{\text{ex}}}{M} \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M^2}{1 + \frac{k-1}{2} M_{\text{ex}}^2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (16)$$

де: p_{ex} , ρ_{ex} , u_{ex} , T_{ex} , M_{ex} - тиск, щільність, температура газу і число Махе на вході газу в сопло. Із співвідношень (15) і (16) отримані залежності (17), з яких можна отримати параметричне рішення задачі про одновимірний газовий потік в соплі змінного перерізу:

$$\frac{p}{p_{ex}} = \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad \frac{\rho}{\rho_{ex}} = \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right)^{\frac{1}{k-1}},$$

$$\frac{u}{u_{ex}} = \frac{M}{M_{ex}} \left(\frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \frac{T}{T_{ex}} = \frac{1 + \frac{k-1}{2} M_{ex}^2}{1 + \frac{k-1}{2} M^2},$$
(17)

За межами сопла рух газу в доквіллі є струминним. Залежно від відносного напрямку руху струменів до поверхонь тангенціального розриву, струмів газу і потік доквілля можуть бути попутними або зустрічними. На межі двох струменів формується область кінцевої товщини з безперервним розподілом швидкості і температури. Ця область є струминним турбулентним пограничним шаром. Потовщення струминного пограничного шару відбувається за рахунок гальмування частин струменя, який приводить, з одного боку, до збільшення поперечного перерізу струменя, а з іншою, до поступового "з'їдання" потенційного ядра струминної області, яка лежить між внутрішніми межами пограничного шару. Як показує практика, однією з основних властивостей такого струменя є постійність статистичного тиску в усіх областях течії, внаслідок чого швидкість в потенційному ядрі струменя залишається постійною. Частина струменя, в якому є потенційне ядро течії, утворює початкову ділянку. У зв'язку з тим, що товщина матеріалу, який розрізається, у більшості випадків менше, ніж початкова ділянка газового потоку, при розрахунках параметрів струменя досить розрахувати довжину початкової ділянки і переконавшись в тому, що вона перевищує товщину матеріалу, прийняти профіль початкової ділянки циліндричним і рівним діаметру початкового отвору сопла, а енергетичні параметри по усій довжині початкової ділянки постійними. Для приведеної схеми формування робочої ділянки струменя газу з використанням відповідних залежностей швидкості газу струменя від відносної площі поперечного перерізу за умови збереження надмірної теплоємності, розроблена програма, яка

включає у себе блок введення початкових параметрів газового потоку, розмірних характеристик сопла і блоки розрахунку параметрів газового струменя після сопла (початкова ділянка) і при її подальшому поширенні. Визначення необхідних енергетичних характеристик струменя виконується за допомогою співвідношення (18). Результати рахунку зображені на рис. 7 ($p_1 = 600$ кПа, $T_1 = 298^\circ\text{K}$, $u_1 = 138$ м/с, $M_1 = 0,4$).

$$P_{min} = \frac{2P^2V^2}{(d_2)^2 \rho(ca)^2 \left(T_{пл} + \frac{L_{пл}}{c} \right)^2}$$

де: d_2 - діаметр струменя; P - потужність випромінювання; V - швидкість подання; a - температуропровідність матеріалу; $L_{пл}$ - прихована теплота і $T_{пл}$ - температура його плавлення.

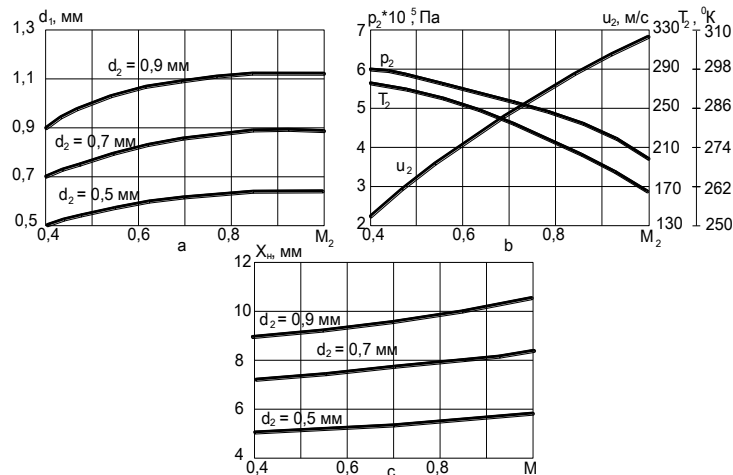


Рис. 7. Залежності характеристик газового струменя в межах її початкової ділянки від числа Маха (а - діаметру струменя, б - тиск, температура і швидкість на його осі, с - довжина ділянки).

Для надання поперечному перерізу різку заданої форми при формуванні функції мети на конфігурацію профілю ізотерми плавлення накладається штраф, подібний (11), а параметри газового струменя вибираються за колишніми розрахунковими співвідношеннями (13-18).

Якщо ТЗ містить більшу кількість нормованих показників, що стосуються, найчастіше, якісних показників результатів обробки, моделювання яких вимагає експериментальних методів проектування, альтернативним підходом є задіяння можливостей додаткового вдосконалення операції технологічним її оснащенням. Замість запропонованого алгоритму рішення теплової і газодинамічної задач процесу газолазерного розрізання листової заготовки для визначення режиму реалізації

технологічної операції може бути використаний експрес метод експериментальної параметризації процесу газолазерного розрізання листового матеріалу [35]. Використовуючи відмічений в експериментах ефект відповідності напрямку струменя технологічного газу, що виходить з різь, оптимальності умов його формування, можна управляти результатами розрізання за даними контролю напрямку струменя і тиску газу. Для цього під заготовкою 7, встановленою на столі 3 ЛТУ з приводом його переміщення 2 (рис. 8а), розташовують на рівній відстані від умовної осі, зміщеної відносно осі променя на відстань $a = d_0/2$ (де: d_0 - діаметр променя на поверхні заготовки), два датчики тиску 4 і 5 з відстанню між ними $b = d_{cmp}$ (де: d_{cmp} - діаметр газового струменя), які підключені до вимірювальної пристрою 6. Оптимальною для вибраної потужності випромінювання P набуває таке значення швидкості різання V , яке задається приводом 2 за умови однакового тиску газу, що створюється струменем, що виходить з нижньої сторони різь, на датчиках 4 і 5. Якщо заготовку з оброблюваного матеріалу надати форму клину з клиновидністю $k = (\delta_{max} - \delta_{min})/l$ (l - довжина заготовки) і розрізання виконувати з потужністю променя P , достатньою для наскрізного прорізання заготовки найбільшої товщини δ_{max} у напрямі клиновидності то обробка виконуватиметься зі змінною швидкістю V для підтримки оптимального напрямку струменя газу, що виходить з різь за умови його рівного тиску на датчики 4 і 5. Зіставляючи послідовність миттєвих значень швидкості подачі V при переміщенні уздовж осі X від початку проходу з відомою клиновидністю k заготовки, можна встановити залежність $V = f(\delta x)$. На рис. 8b показані такі залежності, які побудовані самописцем 9 при розрізанні заготовки з дуба мореного завдовжки $l = 450$ мм с клиновидністю $k/450 = 10$ для променя потужністю $P = 200, 250$ і 500 Вт. Таким чином, увесь діапазон товщин матеріалів, які розрізатимуть, (у прикладі $\delta \in 0,5 \div 5,0$ мм) нормується за один перехід різання модельного зразку. Якщо в ЛТУ не передбачено плавне управління рівнем швидкості поданнячі столу V , запропонована методика може бути використана для побудови залежності при постійній її величині. В цьому випадку обирається швидкість подачі, яка потрібна для розрізання клиновидної заготовки найменшої товщини випромінюванням вибраної потужності; процесор 8 управляє режимом роботи блоку живлення лазера, плавно збільшуючи рівень початкової потужності променя у міру зростання товщини заготовки для

забезпечення оптимальної течії операції розрізання, яка контролюється за тиском на датчиках 4 і 5.

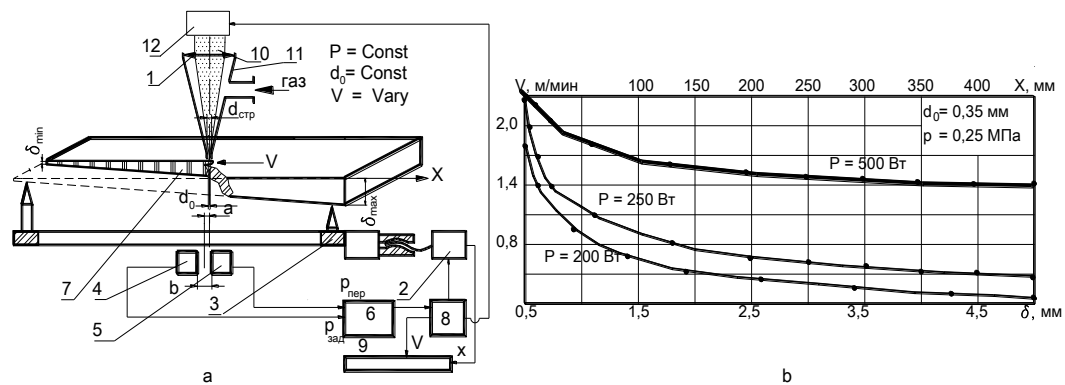


Рис. 8. Експрес метод визначення режиму газолазерного розрізання заготовок завтовшки $\delta \in \delta_{\min} \div \delta_{\max}$

а - схема ЛТУ для реалізації методу (1 - лінза; 2 - привод подачі столу; 3, 4, 5 - датчики тиску; 6 - вимірник тиску в датчиках 4 і 5; 7 - заготовка; 8 - процесор; 9 - графічний пристрій; 10 - промінь лазера; 11 - різак з соплом; 12 - лазер.

б - експериментальні залежності $V = f(P, \delta)$ розрізання дуба мореного завтовшки 0,5 ÷ 5,0 мм.

Розглянуте завдання проектування операції розглядається як однокритерійне, а насправді, частіше вона оцінюється більшою кількістю показників, що стосуються якості, продуктивності і собівартості операції. Моделювання процесу в їх відношенні для накладення додаткового штрафу на режим реалізації операції вимагає особливого розгляду або пошуку засобів компенсації за рахунок додаткового впливу на процес.

2.3. Операції розмірній (прецизійної обробки)

Операції цього виду призначені для формування у виробах елементів різних розмірів і форми (наскрізні отвори і глухі лунки, пази, щілини і виїмки) з нормованими показниками їх якості (точність розмірів, погрішностей подовжньої і поперечної форми, шорсткості поверхні і стану приповерхневого шару). Залежно від розмірів і форми елемента для його формоутворення застосовується декілька технологічних схем таких, як копіювання розмірів і профілю інструменту ($d \leq 0.3$ мм, глибиною до 2 мм), при більшій глибині використовується поступове заглиблення інструменту в тіло виробу, а для елементів більшого поперечного розміру і складної форми застосовується схема трепанації з обходом їх контуру (глибиною до 2 мм), при більшій глибині елементів або для "товстих" виробів застосовується комбінована з двох перших схем: трепанація з поступовим заглибленням інструменту (спіральне свердління [36]).

В усіх схемах обробки використовується механізм самотійного видалення продуктів руйнування матеріалу заготовки надмірним тиском пари, тому для їх формування енергія променя подається порціями (імпульсами) при рівні інтенсивності більше 10^8 Вт/см². Тривалість імпульсів для різних технологічних завдань варіюється від $0,1 \div 10^{-3}$ с (для вільної генерації) до 10^{-12} с в нано технологіях. Складність механізму формоутворення розмірних елементів не дає можливості використати як аналітичні моделі процесу для прогнозування результатів обробки і, тим більше, для проектування операцій, так і чисельні методи рішення теплових задач в їх будь-якій постановці. Проте, технологічне завдання проектування операцій свердління отворів і їх трепанації, а також формування пазів (щілин) суперпозицією окремих отворів (лунок) в їх однокритерійній постановці були вирішені в роботі [37] для перфорації металевих виробів імпульсами з регулярною пічковою структурою за умови розташування поверхні виробу в перетяжці каустики лазерного променя, перетвореного оптичним елементом.

Автором були прийняті деякі спрощення механізму формоутворення лунки, у тому числі, прийнята однакова величина приросту її глибини ΔZ від дії кожного пічку імпульсу, незважаючи на зміни умов опромінення на дні лунки. Крім того, впродовж імпульсу τ передбачається незмінний рівень пичкової інтенсивності I_{Ps} , хоча його енергетична макроструктура, як імпульсу вільної генерації, змінна і складається з переднього фронту, основної частини і задньої ділянки. Таким чином, чим більше реальна схема опромінення буде наближена до розрахункової, тим ближче до заданих розмірів будуть лунки (отвори), оброблені на режимах, встановлених за розробленим алгоритмом. Для формування лунки діаметром d і глибиною Z або наскрізного отвору завдовжки h необхідно вибрати рівні характеристик лазерного променя, умов його перетворення і опромінення, використовуючи наступну послідовність дій:

- вибрати значення густини потужності W_{Ps} теплового джерела в тілі заготовки, яка необхідна для реалізації вибраного механізму руйнування її матеріалу: для випаровування матеріалу з дна лунки її рівень повинен перевищувати 10^7 Вт/см²;
- розрахувати рівень тривалості пічку випромінювання τ_{Sp} за умови обмеження бічного тепловідводу для зменшення кількості розплаву в продуктах ерозії:

$$\tau_{Sp} = 4 \cdot 10^{-3} d^2 / a$$

і уточнити його з набору значень, що можуть бути реалізовані на вибраній ЛТУ:
 $\tau_{S\delta}$;

- визначити товщину шару матеріалу на дні лунки, що видаляється одним пічком:

$$\Delta_l = W_{Ps} \times \tau_{S\delta} (L_u \times \rho),$$

де: L_u - питома теплота випаровування матеріалу заготовки;

- вибрати період дотримання імпульсів t_s , який має бути достатньо тривалим для самостійного видалення продуктів ерозії з порожнини лунки глибиною Z_i , але досить коротким для охолодження матеріалу на дні отвору не нижче температури кристалізації, тобто: $Z_i/V_p + \tau_{S\delta} < t_s < 0,05d^2/a + \tau_{S\delta}$;

де V_p - швидкість розльоту часток ерозійного факела $\sim 10^4$ м/с; Z_i - приймається рівний повній глибині лунки ($Z_i = h$) або товщині заготовки ($Z_i = \delta$) для наскрізного отвору;

- встановити частоту дотримання імпульсів $f_p = 1/t_s$, значення якої уточнюється з ряду значень, які реалізуються на обраній установці, як $f\delta \geq fp$;
- визначити кількість імпульсів, необхідну для формування лунки заданої глибини h або отвору в заготовці заданої товщини δ : $n = \delta/\Delta$.

- розрахувати енергію поодинокого мікро імпульсу (пічку):

$$E_s = W_{Ps} \times \tau_{S\delta} \times \pi d^2 / (4A)$$

- визначити енергію імпульсу (цугу пічків):

$$E = n \times E_s = n \times W_{Ps} \times \tau_{S\delta} \times \pi \times d^2 = \pi \times d^2 \times h \times L_u / (4A)$$

- вибрати діаметр променя на поверхні заготовки: $d_0 = d$;
- розрахувати необхідне значення кута розбіжності променя перед оптичного елементу θ :

$$\theta_p = d_0 / F_{min};$$

де F_{min} - фокусна відстань оптичного елементу, який при використанні тактики дотримання вибраним перерізом перетяжки каустики променя (d_0) за положенням дна оброблюваної лунки, необхідно вибирати елемент з глибиною різкості більшої, ніж глибина лунки h або товщина заготовки δ (для наскрізного отвору), тобто:

$$F_{min} \geq D_{л} [\pi \times h (11, 12\lambda)],$$

де: D_l - діаметр променя на рівні головної площини оптичного елементу(лінзи).

- погодити кут розбіжності променя на виході з лазера θ_l з його розрахунковим значенням θ_p перед оптичним елементом з фокусною відстанню F_{min} , необхідною для формування каустики заданої форми і розмірів; для чого використовується телескоп Галілея [38] зі збільшенням Γ , який розладнується на величину Δ :

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

Отвори і лунки діаметром більше 0,3 мм, глухі пази і наскрізні різи такої ж ширини формуються в результаті суперпозиції окремих отворів (лунок) уздовж контуру оброблюваного елементу (рис. 9а). Якщо перфорація отворів може виконуватися при імпульсній роботі лазера шляхом модуляції імпульсів вільної генерації, то при контурному вирізанні зручніше використати лазер з безперервною генерацією випромінювання, яке перетворюється на імпульсне модуляцією добротності резонатора. В цьому випадку завдання визначення режимів лазерного контурного різання імпульсним випромінюванням зводиться до пошуку рівнів наступних параметрів:

- τ_s - тривалість імпульсу випромінювання;
- f - частота дотримання імпульсів;
- V - швидкість відносного руху лазерного променя і заготовки;
- P_{cp} - середня потужність випромінювання;
- E_s - імпульсна енергія;
- d_0 - розмір лазерного променя на поверхні заготовки.

Вихідними даними для проектування технологічної операції є матеріал заготовки; її товщина (для наскрізного елементу); розміри вирізуваного контура B або ширина b і глибина пазу Z ; допуски на них $It(B)$ або $It(b)$ і $It(Z)$; норма шорсткості поверхні стінок оброблюваних елементів R_z (R_a). Умовами проектування є конструктивні і технологічні параметри ЛТУ: діаметр лазерного променя D_l , тривалість імпульсів випромінювання τ , кут його розбіжності θ , а також параметри оптичної системи: телескопу (збільшення Γ , фокусна відстань його негативної компоненти F_1 , положення телескопу відносно випромінювача x), і набір елементів перетворюючої оптичної системи F_i . Проектування виконується в наступному порядку:

- визначається тривалість імпульсу τ_{sp} , яка необхідна для формування пази заданої ширини $b < 0,3$ мм при заданих розмірах вирізуваного елемента заготовки:

$$\tau_{sp} < 4 \cdot 10^{-3} \times b^2 / a.$$

обирається те значення тривалості зі значень, що реалізуються на ЛТУ, яке найбільш близьке до розрахункового τ_{sd} ;

- визначається частота дотримання імпульсів :

$$f_p > (0,05b^2/a + \tau_{sd})^{-1},$$

приймається частота f_δ , найближча до розрахункової f_p з можливих для вибраної ЛТУ;

- визначається рівень середньої потужності випромінювання, яке дозволяє досягти значення інтенсивності випромінювання в пучку $I_{ps} > 10^7$ Вт/см²:

$$P_{cp} = \pi \times b^2 \times A \times I_{ps} \times \tau_{sd} \times f_\delta / 4;$$

- розраховується рівень імпульсної енергії випромінювання :

$$E_s = \pi \times b^2 \times A \times I_{ps} \times \tau_{sd} / 4;$$

- визначаються умови опромінення :

- діаметр променя на поверхні заготовки приймається рівним ширині реза : $d_0 = b$;
- оптичний елемент (лінза) для перетворення лазерного променя повинен мати глибину фокусу, удвічі більшу ніж товщина заготовки δ для підвищення якості профілю різу (зменшення клиновидності):

$$F_p \geq D[\pi \times \delta / (11,12\lambda)]^{1/2},$$

де: D - діаметр пучка випромінювання на рівні головної площини оптичного елемента : $D = D_n \times \Gamma$;

розрахункове значення фокусної відстані округляється до найближчої більшої величини F_δ з ряду значень, використовуваних в ЛТУ;

- кут розбіжності лазерного променя визначається по наближеній залежності:

$$\theta = d_0 / F_\delta;$$

для узгодження кута розбіжності променя після випромінювача θ_n з розбіжністю θ_p , телескоп розладнується на величину Δ , визначену за залежністю (18);

- визначається величина швидкості відносного переміщення лазерного променя і заготовки V :

$$V_p \leq \frac{b \times W_{ps} \times \tau_{sd} \times f_\delta}{\delta \times \rho \times L_u}$$

Отримане значення швидкості V_p перевіряється по умові виконання вимог до якості поверхні стінки різу (R_z або R_a) або нестабільності його ширини ΔB_{cx} (рис. 9b); оскільки при імпульсній обробці безперервний різ формується послідовністю отворів діаметром d_0 , розташованих з кроком S (рис. 9b), причому їх співвідношення $S/d_0 k_n < 1$. Нестабільність ширини різу ΔB_{cx} залежить від цього співвідношення:

$$\Delta B_{cx} = b[1 - (1 - k_n^2)^{1/2}].$$

При $d_0 = b$ отриману залежність можна перетворити, враховуючи, що $k_n = S/d_0 = V(f_\delta \times d_0)$:

$$\Delta B_{cx} = b \{ 1 - [1 - (V_p / (f_\delta \times b))^2]^{1/2} \}.$$

Тоді на швидкість різання V_p необхідно накласти обмеження із-за нормованих якісних характеристик реза, прирівнюючи погрішність ширини реза ΔB_{cx} величині допуску на його ширину (на розмір вирізуваного контура $It(B)$) або його половину - рівню граничної шорсткості стінки різі R_z (R_a). Граничне значення швидкості обмежується за цими умовами величиною:

$$V \leq f \times b [1 - (1 - \Delta B_{cx} / b)^2]^{1/2}$$

У останній залежності величина f приймається рівній частоті дотримання імпульсів f_δ , якщо в заготовці завтовшки δ наскрізний одиничний отвір досягається заданої глибини $\Delta = Z$ або ненаскрізний паз формується одним імпульсом (рис. 9с), тобто:

$$\Delta = W_{ps} \times \tau_{S\delta} / (L_u \times \rho) = \delta \text{ (або } Z \text{)}.$$

Якщо остання рівність не виконується (рис. 9д), то f_δ визначається за співвідношенням:

$$f_\delta \leq f \times \Delta / \delta$$

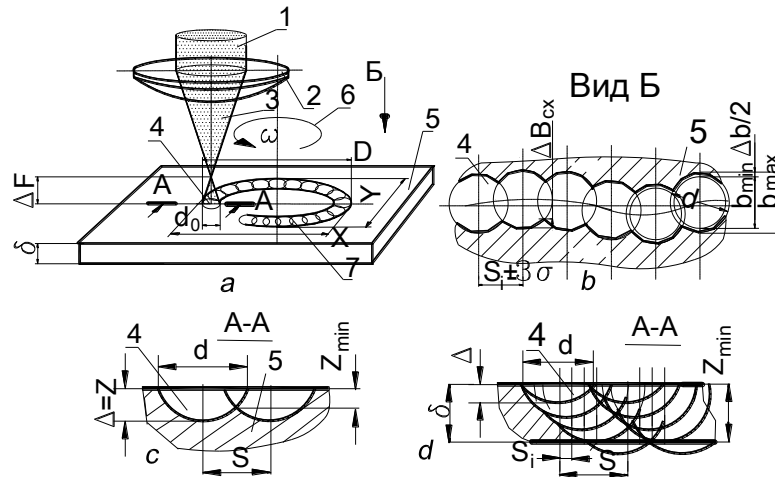


Рис. 9. Схеми формування отвору великого розмір і наскрізного різі
 а - формування контуру порожнини; б - схема формування різі; с - формування дна канавки і д -
 наскрізного різі
 (1 - лазерний промінь, 2 - лінза, 3 - каустика променя, 4 - елементарний елемент різі, 5 - заготовка,
 6 - траєкторія руху променя, 7 - різ)

2.4. Висновки до розділу

1. В основі методик визначення режимів лазерної обробки (технологічного регламенту операції) вискористовуються числові або приблизні аналітичні рішення рівняння теплопровідності, як для процесів з «простим» механізмом створення технологічного ефекту (наприклад, для операцій гартування – нагрівання матеріалу заготовки без його фазових перетворень та без масопереносу), із ускладненим (нагрівання матеріалу з його плавленням в зоні опромінення та з видаленням додатковим інструментом – газовим струменем), так і з «дуже складним», від якого вимагається дозоване (за масою та розмірами) видалення матеріалу із формуємого елемента заготовки, причому, бажано, в вигляді пари, та з самостійною його евакуацією.

2. Для успішного проектування режимів *операцій поверхневого гартування* довелося модернізувати алгоритм рішення теплової задачі шляхом обрання його зворотнього напрямку, винайти спосіб безперервного урахування нелінійностей задачі I та II роду представленням їх у вигляді сплайнів третього порядку з екстраполяцією величин до температури плавлення матеріалу та використати розподіл потужності в зоні опромінення в якості додаткового керуємого фактору для задоволення вимог ТЗ до форми попереку зони загартування.

3. Об'єктивність визначення температури вузлових точок розрахункової сітки при рішенні теплової задачі з плавленням матеріалу в межах зони розрізання листових заготовок (різу) та з його примусовим видаленням з порожнини різу додатковим інструментом (газовим струменем) підтримувалася за рахунок заповнення комірки фіктивним матеріалом із специфічними теплофізичними та оптичними властивостями.

4. При необхідності рішення зворотної задачі при проектуванні операції газолазерного розрізання шляхом відновлення умов опромінення за тепловою історією зони нагрівання ускладнюється його виконання необхідністю согласованого проектування засобів формування газового струменя визначених параметрів, тому запропонована експрес методика експериментального визначення режимів розрізання листів при адаптивній формі організації дослідження оброблюваності модельного зразку із матеріалу заготовки.

5. За більш ніж 50 річний стаж лазерної розмірної (прецизійної) обробки не було створено або опубліковано у відкритому друці жодної методики визначення режимів технологічної операції, кращої ніж представлена у [37] в 1979 році, причому створеної на базі спрощеного аналітичного рішення рівняння теплопровідності для випадку обробки отворів в металевих заготовках. Проектування за цією методикою операцій обробки різних за розміром отворів в латунних корпусах (ЛС59), твердосплавних пластинах (Т15К6) та жароміцних сталях (18Х2Н4ВА) показало високу ступінь співпадіння розмірів оброблених отворів із заданими показниками.

6. Звертаючи увагу на те, що вхідні дані для проектування торкаються тільки розмірних показників операцій, слід зазначити, що облік інших, строгіших вимог до результатів проєктованих операцій потребує експериментального моделювання процесу обробки відносно цих показників.

3. Технологічні прийоми і засоби підтримки норм якості операцій

Для компенсації неврахованих в запропонованих методиках проектування технологічного регламенту операцій нормативних рівнів показників якості їх результатів, можна замість експериментального моделювання використати методи і засоби не режимної дії на ТОС, наприклад, з метою усунення або скорочення впливу обурюючих обставин, що дестабілізують процес дії лазерного променя на заготовку і спотворюють його результати, передбачені технологічним регламентом, встановленим на підставі обмеженої кількості нормованих показників. У зв'язку з тим, що моделювання процесу відносно показників точності розмірних результатів, що нормують міру їх відтворюваності, можливо лише витратними (за часом та ресурсам) експериментальними методами, а використання моделей, як продукту їх реалізації, для формування додаткових штрафних функцій в завданнях оптимізації, подібних (11) і (12), є неефективним унаслідок того, що вони є такими, що коротко живуть, вимагають регулярного оновлення. У зв'язку з цим, для вибору напрямів при розробці прийомів і засобів вдосконалення технологічних операцій використовуємо дані досліджень структури їх сумарної похибки [4, 5, 22, 23, 25, 26].

3.1. Операції поверхневої термообробки

У прогнозній структурі сумарної похибки розмірних результатів поверхневого лазерного загартування, передбаченого перцептроном у вигляді тришарової штучної нейронної мережі [26] з прямим поширенням сигналу, отримані данні впливу кожного учасника ТОС на сумарну похибку (рис. 10) при імпульсному (а) та безперервному (б) режимах нагріву заготовки досить близькі до результатів обмірів параметрів загартованого шару, отриманого в натурних випробуваннях, причому для обох режимів порядок і сила впливу основних керованих чинників подібні для поперечних b і подовжніх z розмірів зони загартування.

Найбільший вплив робить нестабільність поглинальної здатності A : при безперервному режимі на глибину одиничної зони вона викликає 53,9% похибки, на ширину зони - 48,1%. Результати загартування в імпульсному режимі визначаються на 48,3% по глибині зони і на 41,7% по її діаметру. Друге місце при безперервному

опроміненні займають помилки налаштування енергетичного режиму опромінення $HP = 33,5\%$ для глибини зони і $30,3\%$ для ширини. У імпульсному режимі на другому місці виявилася нестабільність швидкості охолодження зони, що позначилося на випадковій зміні рівня температури загартування $T_{зак}$ і, як наслідок - на діаметрі зони $19,1\%$, тоді як її глибина на $18,2\%$ залежала від коливання рівня імпульсної енергії E .

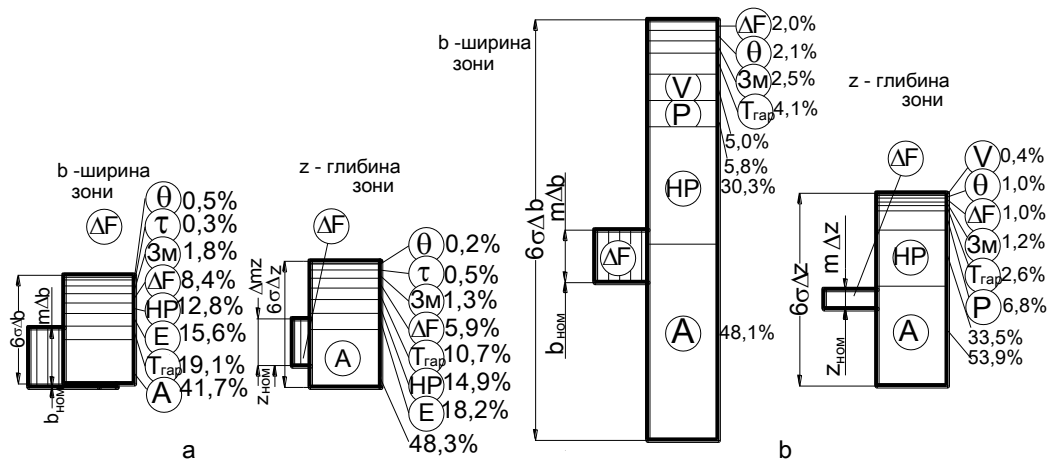


Рис. 10. Схема структури сумарної похибкирозмірів зон гартування в операціях з імпульсним (а) та безперервним (б) опроміненням

(A – рівень поглинання поверхні заготовки, $T_{зак}$ – температура гартування матеріалу заготовки, E (P) – імпульсна енергія (потужність) променя, HP – налагодження режиму, ΔF – позиціювання заготовки, $Зм$ – зміщення положення заготовки, τ – тривалість імпульсу, θ – кут розбіжності променя).

Далі, безперервне загартування на $6,8\%$ нестабільне по глибині із-за нестабільності потужності променя P і на $5,8\%$ по ширині зони. При імпульсному загартуванні на третьому місці помилки при налаштуванні режиму $HP = 14,9\%$ по впливу на глибину і нестабільність імпульсної енергії E - на діаметр зони $15,6\%$. Нестабільності інших чинників впливають слабкіше і розташовані в наступному порядку: для безперервного режиму швидкість подачі V ($5,0\%$), $T_{зак}$ ($4,1\%$), зміщення положення заготівлі $Зм$ ($2,5\%$), кут розбіжності ($2,1\%$), похибка налаштування положення заготовки в каустиці променя ΔF ($2,0\%$) - для ширини: $T_{зак}$ ($2,6\%$), $Зм$ ($1,2\%$), ΔF ($1,0\%$), θ ($1,0\%$) і V ($0,4\%$) - для глибини. Для імпульсного режиму ΔF ($8,4\%$), $Зм$ ($1,8\%$), тривалість імпульсу ($0,5\%$) і θ ($0,3\%$) - для діаметру зони і $T_{зак}$ ($10,7\%$), ΔF ($5,9\%$), $Зм$ ($1,3\%$), τ ($0,5\%$) і θ ($0,2\%$). Узагальнюючи ці дані, можна стверджувати, що головними винуватцями розмірної нестабільності одиничних зон загартованого шару є похибки чинників, що визначають енергетичний режим процесу нагріву A , HP , $E(P)$, тому одним з напрямів стабілізації процесу опромінення є підвищення і стабілізація рівня поглинання енергії випромінювання оброблюваною поверхнею.

3.1.1. Методи стабілізації рівня поглиненої енергії

Для найбільш поширених лазерів на CO_2 загальноприйнятим є застосування поглинаючих діелектричних покриттів опромінюваної поверхні: оксидування або фосфатизація хімічним шляхом. Проте, необхідність в додаткових операціях покриття, включаючи внутрішню заводську логістику заготовок, і утилізацію залишків покриття після операції не відповідають нормам ефективності і економічності. Пропонуємо натомість зручніший і оперативний метод стабілізації - нанесення газової сажі на поверхню зони опромінення. Вона є губчастим вуглецем, для горіння якого в газовому середовищі бракує кисню, тобто при коефіцієнті надлишку окисника $\alpha < 1$ (при $\alpha > 1$ сажа не утворюється). Коефіцієнт поглинання вуглецю в широкому діапазоні довжин хвиль випромінювання помітно перевищує поглинальні здібності заліза, основу конструкційних матеріалів, так $\text{Fe}_{1,06} = 0,35$; $\text{Fe}_{10,6} = 0,06$, а для вуглецю $\text{C}_{1,06} = 0,77$; $\text{C}_{10,6} = 0,51$. Для нанесення покриття на локальну ділянку поверхні на неї треба направити струмінь газу, утримуючий вуглець (метан, бутан, пропан), із сопла відповідного діаметру, розташованого на відстані l від неї, так, щоб жовто - червона зона факела торкалася холодної поверхні заготовки перед її опромінюваною зоною [39]. При зміні напрямку подачі необхідно міняти положення сопла, щоб випереджати зону опромінення. Залишки покриття після лазерного опромінення віддаляються розчинником.

При опроміненні заготовок з матеріалів, що мають досить високу поглинальну здатність для випромінювання основних довжин хвиль, проблема нестабільності поглинання залишається і пов'язана з мінливістю характеристик оброблюваної поверхні (висоти і напрямку шорсткості, нахилу по відношенню до променя, наявності ділянок з органічним і неорганічним брудом і ін.). У основу пристрою для опромінення із стабільним рівнем поглиненої енергії (рис.11) покладено принцип управління режимом обробки (потужністю випромінювання або швидкістю подачі) залежно від рівня відбитого від поверхні заготовки сигналу безпосередньо перед зоною опромінення [40].

Налагодження та робота з пристроєм виконується за наступними правилами. Для вибраних режимів обробки, у тому числі для діаметру зони опромінення d_0 і перетворюючої лінзи 4 з фокусною відстанню F_4 , визначаються умови опромінення, тобто величина зміщення поверхні заготовки з фокальної площини лінзи ΔF_4 . $\Delta F_4 = d_{\Delta F_4} \times F_4 / (D_0 - F_4 \times \theta_{D_0})$. Далі вибираються параметри лінзи 3 для відбору частини потужності променя: діаметру центрального отвору в ній (D_0) і її фокусної відстані F_3 : $F_3 = F_{34}(F_4 - d_{34}) / (F_4 - F_{34})$, де F_{34} - фокусна відстань об'єктиву з двох лінз 3 і 4 з відстанню між ними $d_{34} \pm \Delta$: $F_{34} = F_3 \times F_4 / [F_3 + F_4 - (d_{34} \pm \Delta)]$. Робочий відрізок об'єктива з двох лінз b_{34} дорівнюватиме: $b_{34} = F_{34} [1 - (d_{34} \pm \Delta) / F_3]$. На відстані $(F_4 + \Delta F_4)$ від головної площини лінзи 4 розташовують поверхню заготовки 13 і зміщують лінзу 3 на величину $\pm \Delta$ з штатного її положення a для концентрації периферійної частини променя $D - D_0$ в кільце навколо зони опромінення діаметром $d_k = d_{\Delta F}$, розміром $d_{\Delta F} + (0,1 \div 0,5)$ мм. Процесор 10 повинен мати програму підключення до вимірника 9 тих секторів 8 (одного або двох) датчика 7, розташованих з боку подачі заготовки 13. При зміні напрямку її переміщення повинні вибиратися інші сектори 8 датчика 7 на тих же умовах. Вимірник 9 аналізує сигнал від підключених секторів 8 і, у разі зміни потужності відбитого сигналу, що визначає процесор 10, останній виробляє сигнал, що управляє, або на корекцію швидкості подачі V приводом 11 столу 15, або на відповідну зміну потужності променя P блоком живлення лазера 12. Таким чином враховується дійсний коефіцієнт поглинання ділянки поверхні заготовки перед її опроміненням, тобто стабілізується рівень поглиненої енергії, причому з меншими матеріальними і часовими витратами.

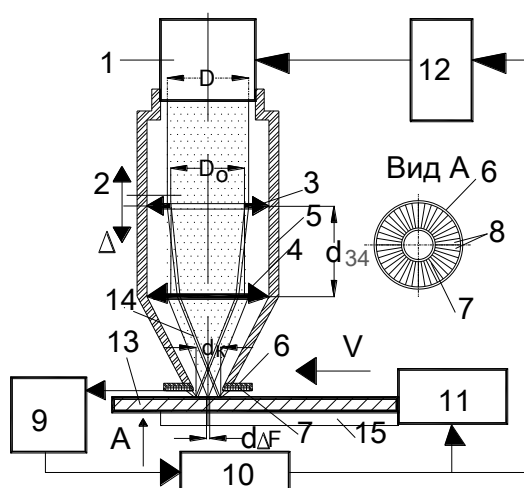


Рис. 11. Пристрій для опромінення поверхні заготовки із стабілізацією рівня поглиненої енергії.

(1 - лазер, 2 - промінь лазера, 3 - лінза з центральним отвором, 4 – лінза, що перетворює, 5 – корпус пристрою, 6 - корпус датчика потужності відбитих променів, 7 - фото датчик з секторами 8, 9 - вимірник, 10 - процесор, 11 - привод столу 15, 12 - блок живлення лазера, 13 - заготовка, 14 - каустика центральної частини променя)

3.1.2. Облаштування для поліпшення характеристик оброблювального інструменту

При незначній модернізації пристрою (рис. 11), а саме, збільшенні фокусної відстані лінзи 4 до $F_4 = 200 \div 250$ мм і використанні лінзи 3 с отвором $D_0 = 0,83D\sqrt{\alpha}$ (α - коефіцієнт зосередженості випромінювання) для відбору периферійної частини на рівні половинної максимальної інтенсивності в промені: $I_{PD_0} = 0,5I_{P_0}$ її можна застосувати для вирівнювання інтенсивності в зоні опромінення. Тоді для накладення периферійного променя 8 біля межі опромінювальної зони його потужність підсумується з потужністю центральної частини променя 9, що має нерівномірний розподіл (частіше, Гаусів), за рахунок чого воно вирівнюється майже до рівномірного (рис. 12а) [41]. Для досягнення такого ефекту для вибраних значень F_4 , D , D_0 і d_{34} (відстань між лінзами 3 і 4, що може змінюватися) обирається лінза F_3 : $F_3 = (d_{34} - F_4) / [1 + (D_0 \times \Delta F_4 / D \times \Delta F_{34})]$, де ΔF_4 - зміщення поверхні заготовки в каустиці лінзи 3: $\Delta F_4 = -d_{\Delta F_4} \times F_4 / D_0$, а $\Delta F_{34} = d_{\Delta F_{34}} \times F_{34} / D$ ($F_{34} = F_3 \times F_4 / (F_3 + F_4 - d_{34})$). На рис. 12а показана суперпозиція розподілів інтенсивності для умови $d_{\Delta F_4} = d_{\Delta F_{34}}$ і результат дії такого виду розподілу на форму і глибину зони загартування. Якщо при такій схемі опромінення необхідно стежити за рівнем поглинання поверхнею заготовки випромінювання для стабілізації енергії, що вводиться в нею, як це виконується на ЛТУ (рис. 11), то необхідно виконати умову $d_{\Delta F_{34}} = d_{\Delta F_4} + (0,5 \div 1)$ мм, щоб створити потік випромінювання до фотодатчиків (ФД) (рис. 12b) від поверхні за межами опромінювальної зони, а до торця сопла прикріпити кільцевий секторизований фото датчик 7 (см рис. 11) з відповідними приладами. Це дозволить керувати стабільністю розміру зони, але менших розмірів і у формі сегменту кола (рис. 12b).

Для керуванням законом розподілу потужності в зоні опромінення, наприклад, для реалізації підсумків рішення задачі загартування різальної частини різця (рис. 2), необхідно забезпечити несиметричний профіль розподілу інтенсивності, побудований розрахунковим шляхом (рис. 5). Для цього можна застосувати інтегральний дзеркальний елемент - поворотне дзеркало, виготовлене з листової міді з відповідним покриттям і розділене після закріплення на нім 35 трубок 2 з

п'єзокерамики на матрицю 1 з 5×7 , алмазним кругом або лазерним рiзанням (рис. 13а). Протилежний торець трубок встановлено на друкованій платі для пiдведення живлення, що управляє, до кожної з них. Вiд рiвня високочастотної напруги залежить

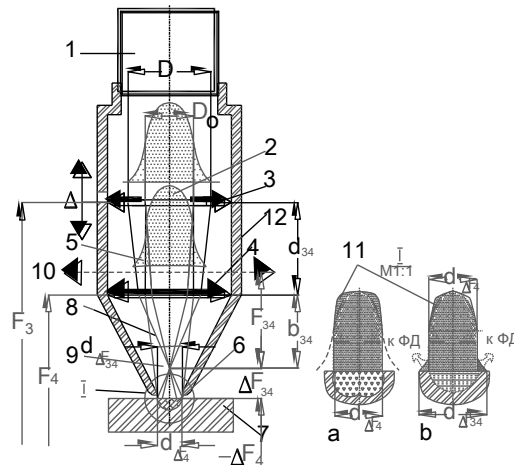


Рис. 12. Схема ЛТУ для поверхневого загартування променем з рiвномiрним розподiлом потужностi в зонi опромiнення

(1 - лазер, 2 - розподiл потужностi в центральнiй частинi променя, 3 - лiнза, 4 - перетворююча лiнза, 5 - розподiл потужностi на периферiї променя, 6 - сопло рiзача, 7 - заготовка, 8 - каустика периферiйного променя, 9 - каустика центрального променя, 10 - умовна лiнза, 11 - розподiл потужностi в зонi опромiнення (a - при повному накладеннi периферiйного променя на центральний, b - накладення з формуванням сигналу до ФД), 12 - корпус перетворюючої системи iз лiнз 3 i 4).

Вiд рiвня високочастотної напруги залежить кут вигину трубки 2 i, вiдповiдно, кут нахилу вiльного торця iз закрiпленим елементарним дзеркалом 1. Нахиляючи дзеркала 1, можна забезпечити обраний закон розподiлу потужностi в зонi опромiнення [42]. Для осесиметричних променiв рекомендується використати конструкцiю подiбного виду, але з радiально розташованими дзеркалами 1, закрiпленими на торцях п'єзоелементов, що згинаються в радiальному напрямi (рис. 13b) [43].

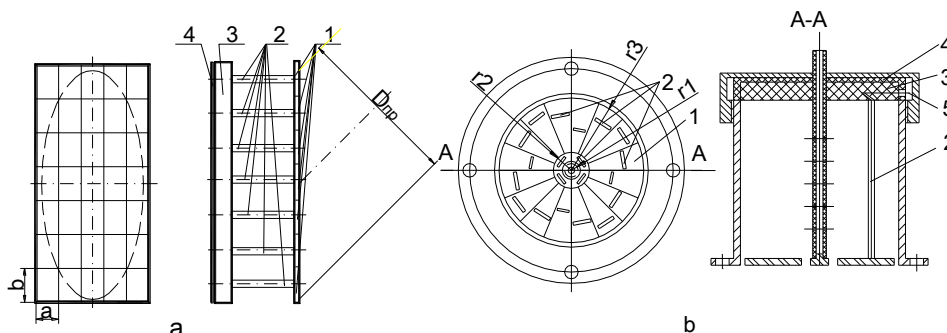


Рис. 13. Схема поворотного мозаїчного дзеркала з мiдними вiдбиваючими елементами, забезпеченими трубчастими (a) i плоскими (b) п'єзоприводами iх нахилу (1 - елементарне дзеркало, 2 - п'єзоелементи, 3 - основа, 4 - плата друкарського монтажу, 5 - дрiт)

3.2. Операції газолазерного розкрою листового матеріалу

Для подібного поліпшення результатів операції газолазерного розрізання листових заготовок, режими виконання якої вибрані в результаті чисельного рішення рівняння теплопровідності або експрес методом по зовнішніх проявах якісного розрізання (рис. 8), напрями додаткової дії можна визначити з аналізу структури сумарної похибки ширини різь, поява якої викликається дією некерованих і неконтрольованих чинників процесу обробки (рис. 14).

Переважаючий вплив нестабільності енергетичних характеристик лазерного променя, включаючи мінливість його розмірів на поверхні заготовки помітно для імпульсного і безперервного режиму подання енергії: в першому випадку енергія безпосередньо впливає на ширину різь b : E на 28,1% контролює її величину, а кут розбіжності θ , впливаючи на розмір зони опромінення, ще на 22,2% робить ширину різь залежною від інтенсивності променя на поверхні заготовки. У цьому ж напрями діють нестабільності налаштування режиму роботи лазера HP (16,0%), реального положення поверхні заготовки Z_m (13,2%) і його проектного значення ΔF (9,4%).

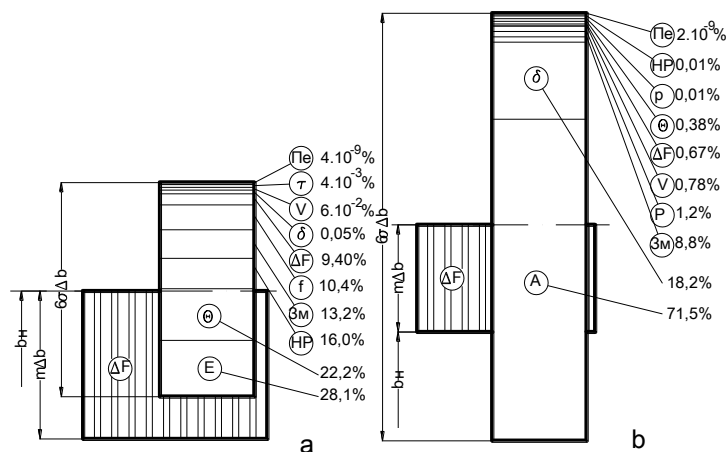


Рис. 14. Структура сумарної похибки ширини різь при імпульсному (а) і безперервному (б) режимі газолазерного різання.

Нестабільність частоти подання імпульсів f помітно впливає на ширину різь (10,4%), проте, легко усувається стабілізацією роботи генератора тактових імпульсів або використанням модулятора добротності резонатора з функцією передустановки заданої кількості імпульсів. Хоча при імпульсному опроміненні різь також продувається струменем газу, його ефективність як евакуатора продуктів ерозії невисока, оскільки велика їх частина самостійно видаляється при сублімації речовини, що виносить при цьому рідкі і тверді його частки. Струмінь газу швидше охолоджує зруйнований матеріал, знижує його схильність до прилипання і цілеспрямовано виносить з порожнини різь, тому склад і тиск газу не роблять

помітного впливу на кількісні результати вирізання. Оскільки прогнозний розрахунок виконувався для твердотілого дискового лазера на YAG: Nd^{+3} , випромінювання якого ($\lambda = 1,06$ мкм) досить добре поглинається поверхнею металевих листів, особливо при їх нагріві вище 300°C , тому вплив нестабільності їх поглинальних властивостей не позначився. Оскільки в якості джерела з безперервним поданням променистої енергії використовувався лазер на CO_2 , а режим його роботи забезпечував плавлення матеріалу, на перше місце вишли нестабільність поглинальних властивостей матеріалу: A (71,5%) і коливання товщини листу (18,2%). Некерована зміна початкових умов опромінення 3m (8,8%) викликає необхідність підтримки незмінного рівня розрахункового початкового положення заготовки в каустиці променя (ΔF). Нестабільність інших чинників процесу вирізання або його чутливість до них несуттєво впливають на точність ширини різку, у тому числі тиск технологічного газу (p).

Для стабілізації характеристик лазерного променя твердотілого лазера (E і θ) рекомендується використовувати холодильник в системі охолодження випромінювача для виключення варіації температури кристалічного активного елемента, від рівня якої залежить коефіцієнт його посилення, а також міра спотворення торців, тобто змінне "линзування" резонатора, таке, що призводить до варіацій θ . Більше 20% випадкової складової сумарної похибки $6\sigma\Delta b(\Delta F)$ і систематичну її частину $m\Delta b$ можна усунути, використовуючи високоточну методику подвійного зображення [44] і пристрій, що її реалізує [45], для початкового відносного позиціонування перетворюючої лінзи і поверхні заготовки. Для підтримки налагодженого рівня ΔF при контурному розрізанні нежорстких або деформованих листів як при імпульсному, так і безперервному режимі подання енергії, можна рекомендувати схему оптичної системи ЛТУ [46], яка відрізняється від звичного для газолазерного різання різача тим, що він (рис. 15) забезпечений приводом 6 - 7 керованого переміщення в напрямі, перпендикулярному до поверхні заготовки 12, а до його порожнини через штуцер 8 для подання технологічного газу підключений датчик тиску 9, причому на вході в газову магістраль встановлена змінна діафрагма 10 діаметром d_{ex} для управління витратою газу.

Вимірний тиск p_6 спрямовується у блок 11 для порівняння із заданим його значенням p_3 і за його результатом управляється робота приводу 6 - 7 для досягнення

їх рівності: тобто він збільшує проміжок δ між торцем сопла 4 і поверхнею заготовки 12 - для зменшення p_e і навпаки. Враховуючи, що відстань l між торцем сопла 4 і головною площиною лінзи 2 фіксовано, а проміжок δ підтримується на постійному рівні, розрахункове положення лінзи відносно поверхні $H = F \pm \Delta F$ залишається незмінним.

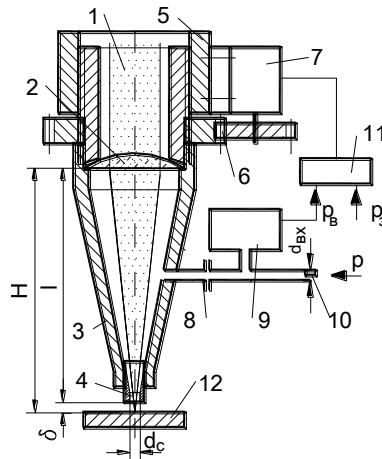


Рис. 15. Схема пристрою для автоматичної підтримки на незмінному рівні відносного положення оптичного елемента (лінзи) і заготовки.

(1 - промінь лазера, 2 - оптичний елемент (лінза), 3 - різак, 4 - сопло, 5 - корпус, 6, 7 - привод переміщення оптичної системи, 8 - штучер, 9 - датчик тиску, 10 - вхідна діафрагма, 11 - блок порівняння, 12 - заготовка).

Вплив нестабільностей більшості чинників, що впливають на точність ширини різку при безперервному поданні променистої енергії (рис. 14b), може бути ослаблений або усунений при виконанні операції за адаптивною формою її організації. Керуючий сигнал оцінює якість процесу розрізання за часом прорізання заготовки наскрізь. Було встановлено експериментально, що при оптимальній швидкості подачі V повне прорізання листа відбувається за час проходження лазерним променем відстані, рівної його розміру на поверхні заготовки d_0 [12]. В цьому випадку нижня кромка різку знаходитиметься на відстані $a = r_0 = d_0/2$ від осі променя в напрямку, протилежному до різання. Якщо під заготовкою 11 встановити два датчики тиску 7 і 8: 8 - на рівні крайки різку 13, а 7 - на відстані $b = d_c$ уздовж нього, то струмінь технологічного газу, що виходить з різку, пройде між ними і при відстані між датчиками $b = d_c$ не зробить тиску на жоден з них. Для швидкості подачі V , меншої оптимального значення, повне прорізання листа станеться на відстані меншому, ніж радіус променя r_0 . В цьому випадку струмінь технологічного газу з різку відхилиться від оптимального свого положення і потрапить на датчик тиску 8, який спрацює. При перевищенні швидкості подачі оптимального значення повне прорізання листа не станеться за час

проходження лазерним променем відстані, рівної його діаметру d_0 , при цьому прорізання нижніх шарів матеріалу листа відбувається без підігрівання променем, а лише за рахунок кінетичної енергії струменя газу і продуктів ерозії матеріалу при їх евакуації з порожнини різку. Це знижує якість його стінок, а нижня крайка зміститься на відстань a , більшу, ніж радіус r_0 променя, від його осі. В цьому випадку струмінь робочого газу викличе спрацювання датчика тиску 7 і його сигнал поступить на вхід інтерфейсу 10, який залежно від того, який з датчиків (7 або 8) спрацював, видасть відповідний керуючий сигнал на привод 9 робочого столу 12 із заготовкою 11 на ньому. Спрацювання датчика 7 веде до зменшення швидкості подачі столу V , а 8 - до її збільшення. При оптимальному значенні швидкості подачі датчики не піддаються дії струменя газу, що витікає з сопла 6. В результаті постійного контролю за ходом операції розрізання листа і управління швидкістю подачі виключається вплив випадкових коливань товщини заготовки і властивостей її матеріалу (теплофізичних і оптичних), а також параметрів лазерного променя (потужності і кута розбіжності) на якість результатів операції розрізання. Подібний результат може бути досягнутий при незмінній швидкості V , керуючи за тими ж ознаками рівнем потужності променя через канал 10 – 2 (блок живлення лазера).

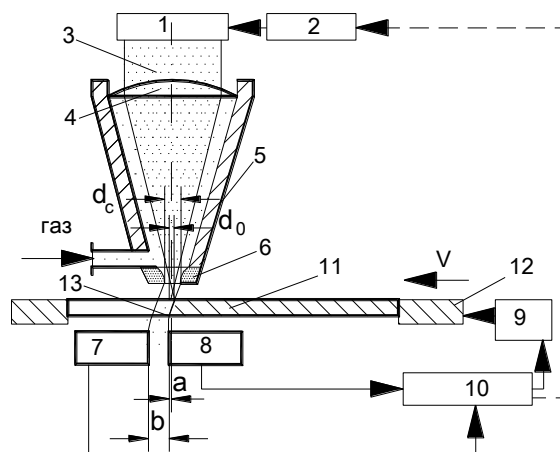


Рис. 16. Схема ЛТУ для газолазерного розрізання листів за адаптивною формою організації операції.

(1 - лазер з блоком живлення 2, 3 - лазерний промінь, 4 - лінза, 5 - різак, 6 - сопло, 7, 8 - датчики тиску, 9 - привод подачі столу 12, 10 - інтерфейс, 11 - заготовка, 13 - крайка різку).

Подальшого підвищення якості, продуктивності і ефективності операції розрізання листів з горючих матеріалів (деревина, пластик, тканини і ін.) можна досягти за рахунок залучення енергії керованого горіння матеріалу при своєчасному припиненні екзотермічної реакції. Це досягається складом і послідовністю подання технологічних газів: збільшення ефективності нагріву оброблюваного матеріалу

відбувається при використанні активного (кисневмісного) газу, а високу якість різку (низьку шорсткість його поверхні і мінімальну ширину) надає гасіння автогенних явищ порціями інертного (неактивного) газу. Експериментально встановлено, що чергування газів пов'язане з режимами різання і властивостями матеріалу, і частота зміни газів вибирається із співвідношення $f = V^2/a$ (a - температуропровідність матеріалу, що розрізається) [48].

Процес газолазерного вирізання виробів з листів використовується також для формування отворів великих розмірів за схемою трепанації. Найчастіше робочий рух надається променю при нерухомій заготовці. Скануючі пристрої на прозорій оптиці (оптичному клині, ексцентричній лінзі та ін.) потребують переналадження при зміні розміру отвору, що вирізається. Якщо в одній заготовці (виробі) потребується виконання декількох різних за розміром отворів, ця операція супроводжується необхідністю періодичної заміни оптичного елемента (клину), що надає променю скануючий рух. Це викликає супутню необхідність його перепозиціювання не тільки відповідно до зон розташування оброблювальних отворів, а також для формування їх попереків.

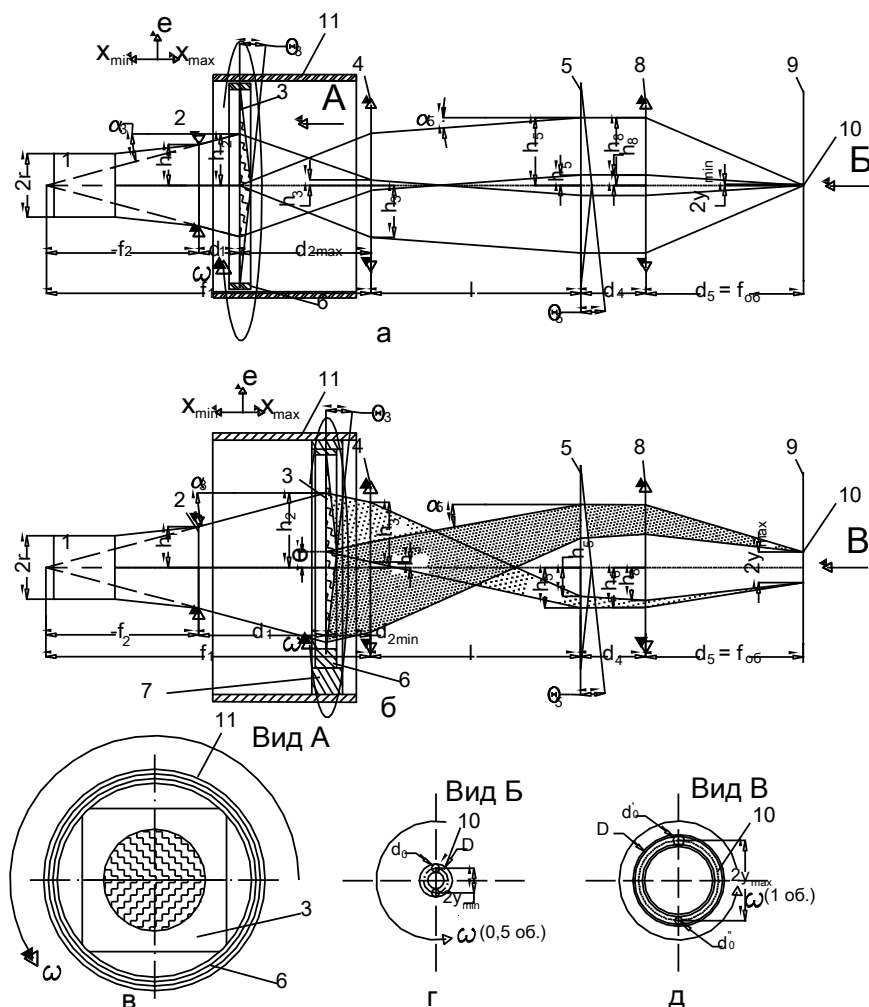


Рис. 17. Технологічна установка для вирізання отворів великих розмірів методом трепанації (1-лазер, 2-від'ємна лінза телескопу 2-4, 3-біпризма, 5-аксікон, 6, 7-механізм радіального зміщення біпризми, 7-оправка сканування біпризми навколо осі променя, 8-робочий об'єктив, 9-заготовка, 10-слід сканування променя на поверхні заготовки)

Пропонується використання технологічної установки для трепанації отворів лазерним променем з оптичною системою, яка дозволяє плавно змінювати розмір отвору, що обробляється, без необхідності переналаштування робочого об'єктиву [49]. Схема цієї технологічної установки зображена на рис. 17.

Вона утримує лазер 1 та розташовані послідовно вздовж осі його променя афокальний телескоп, який складається із негативної 2 та позитивної 4 лінзи із суміщеними передніми фокальними площинами, аксікон 5 з кутом біля основи θ_5 , розташований на відстані l від позитивної лінзи 4 телескопу, та об'єктив 8, причому в середині телескопу з можливістю осьового і радіального переміщення та обертання навколо осі променя встановлено біпризму 3 з кутом біля основи θ_3 , який пов'язаний з кутом θ_5 аксікону 5 співвідношенням: $\theta_3 = \theta_5 / (1 - d_{2max} / f_4)$, де: d_{2max} – максимальна відстань від позитивної лінзи 4 до біпризми 3 в її осьовому переміщенні, f_4 – фокусна відстань позитивної лінзи 4 телескопу, а відстань l від останньої до аксікона 5 повинна дорівнювати:

$$l = \frac{r|\Gamma_m| - \theta_3(n-1)d_{2max}}{\text{tg}[\theta_3(n-1)(1 - d_{2max} / f_4)]},$$

де: r – радіус лазерного променя; $\Gamma_m = f_1/f_2$ – збільшення телескопу; n – показник заломлення матеріалу аксікону та біпризми.

Технологічна установка працює наступним чином. Лазер 1 генерує цільний циліндричний пучок діаметром $2r$, який, проходячи через негативну лінзу 2, біпризму 3 і позитивну лінзу 4, перетворюється у два пучки (а) внаслідок заломлення на оптичних клинах біпризми 3 (б). Далі ці пучки надходять на аксікон 5, у якого кут біля основи θ_5 обрано таким чином, щоб після заломлення на ньому пучки поширювалися паралельно оптичній осі системи за кутом падіння променя на аксікон 5, який відповідає максимальній відстані d_{2max} між лінзою 4 телескопу та біпризмою 3 (а). Це досягається за таких умов:

- кути біля основ біпризми 3 і аксікону 5 співвідносяться, як:

$$\theta_5 = \theta_3(1 - d_{2max} / f_4)$$

- відстань розташування аксікона 5 відносно лінзи 4 l повинна перевищувати відстань до перетяжки лінзи 4:

$$l = \frac{r|\Gamma_m| - \theta_3(n-1)d_{2max}}{\text{tg}[\theta_3(n-1)(1-d_{2max}/f_4)]}$$

При виконанні таких умов плавне змінення діаметрів кільцевих контурів D (отворів) 10 виконується внаслідок переміщення біпризми 3 вздовж осі оптичної системи відносно лінзи 4 та її обертанні навколо осі променя на кут π і пояснюється змістом малюнків a та z . При цьому діаметр кільця в фокальній площині об'єктиву визначається за рівнянням:

$$D \approx 2f_{o\delta}\theta_3(n-1)(1-d_2/f_{o\delta})$$

де: $f_{o\delta}$ – фокусна відстань об'єктиву. Реальний розмір отвору після трепанації складається з діаметру сканування D та діаметру сфокусованого променя на поверхні заготовки d_0 : $D_{ome} = D + d_0$ та формується послідовним випаровуванням її матеріалу вздовж контуру переміщення – кола діаметром D . Сумарна імпульсна енергія в лазерному промені визначається необхідністю створення відповідного рівня інтенсивності ($> 10^7$ Вт/см²) в зоні опромінення діаметром $d_0 = f_{o\delta} \theta$, тобто $E = 2 \times I_p \times (\pi d_0^2/4)$. Для режиму опромінення із прикладу, наведеного вище, це дорівнює $E = 1,4$ Дж, що майже в 10 разів менше потрібного для схеми кільцевої трепанації.

Розмір контуру переміщення D може плавно змінюватися внаслідок переміщення біпризми на відстань d_2 в межах: $d_{2min} < d_2 < d_{2max}$, які визначаються параметрами телескопу 2 - 4. При цьому довжина робочого відрізка d_5 не буде змінюватися при переміщенні біпризми 3 і визначається фокусною відстанню об'єктиву 8 ($f_{o\delta}$). В реалізованій оптичній системі з телескопом $\Gamma = 4^*$ ($f_2 = 25$ мм та $f_1 = 100$ мм) та з біпризмою з кутом $\alpha = 9^\circ$ і аксіконом 5 з кутом $2,7^\circ$, який розташовано на відстані 200 мм від телескопу 2 – 4, використовували об'єктив 8 з $f_8 = 100$ мм. Якщо в телескопі переміщувати біпризму 3 з відстані $d_{2min} = 2,4$ мм до $d_{2max} = 70$ мм, то діаметр зони опромінення змінеться в межах $D = 0 \div 10,4$ мм.

Додаткова можливість додається оптичній системі внаслідок надання функції зміщення біпризми 3 з осі променя на величину ексцентриситету e (δ), що призводить до керуемого змінення енергонасиченості променів після їх заломлення біпризмою 3. Один з них (на малюнку δ – нижній) буде мати більшу енергію та може виконувати більш енергоємну частину операції (δ), наприклад, вирізання контуру отвору, а

другий – формування фаски у вхідній його частині, або виконувати зварювання листових заготівки внахлест кільцевими заклепками у режимі глибокого (кинджального) проплавлення, а менш енергетичним – виконувати «лікування» гирла зварювального шва. Для виконання такої операції потрібно її виконувати протягом обертання біпризми на цілий оберт.

Використання запропонованої установки дозволяє підвищити точність обробки внаслідок зменшення кількості переналаштувань оптичних елементів, тобто можливиз похибок.

3.3. Операції розмірної (прецизійної) обробки

Проектування режимів операцій прецизійної лазерної обробки отворів, лунок, пазів, різів можна вважати найскладнішою процедурою технологічного забезпечення у зв'язку з тим, що таке завдання є багатокритерійним. Технологічний регламент повинен враховувати не лише вимоги до розмірів оброблюваних елементів, але і нормовані показники їх точності, якісних показників подовжньої і поперечної форми, шорсткості оброблених стінок, а також стану матеріалу в приповерхневому шарі. Необхідно також брати до уваги техніко-економічні показники і продуктивність операції. За винятком останніх моделювання інших показників може виконуватися тільки експериментальними методами, що припускає наявність певних знань і умінь. Свідомством вищесказаного являється зміст монографії [36], у якій разом з великою кількістю прикладів прекрасно виконаних операцій макро, мікро і нано прецизійної обробки і при спробах пояснити фізичний зміст відповідних процесів, відсутнє поняття режиму виконання операцій, не говорячи про приклади їх вибору. Можна припустити, що це або прояв підходу "know how...", або створення операцій з подібними результатами є підсумком спеціальних наукових досліджень.

Для спрощеної (інженерної) методики проектування пропонується використати деякі технологічні тонкоші і пристрої, які дозволяють досягти необхідних результатів операції, спроектованої з урахуванням вимог до розмірних її показників (див. розділ 2.3). Підставою для пошуку напрямів вдосконалення операцій можуть служити також результати аналізу структури сумарної похибки розмірів елементарних лунок (рис. 18a) або отворів (рис. 18b), що становлять основу операцій при безпосередньому формоутворенні елементу виробу або в результаті їх суперпозицій на його поверхні

або в його тілі. Значущість впливу нестабільностей практично усіх чинників (характеристик променя E, τ, θ і N), технологічних прийомів (наладка режиму обробки НР, положення заготовки в каустиці променя ΔF , її зміщення при установці $Зм$ і перекид $Пе$) від 4,36 до 48,31% утрудняє вибірку та дозовану дію на процес формоутворення, тому рішення треба шукати в зміні тактики досягнення якісного результату: замість прийнятого принципу роботи на "налагодженій" ЛТУ з відповідним початковим розташуванням очікуваного поля розсіяння розміру d оброблюваного елементу в його полі допуску $It(d)$, що враховує природний його дрейф в часі, і передбачаючи переналадку ЛТУ при досягненні розміром межі допустимого значення, пропонується схема "підгонки" розміру в полі допуску шляхом *покрокового* його збільшення (від імпульсу до імпульсу) з керованою дискретністю приросту. Якщо робота на налагоджених верстатах можлива лише за умови $6\sigma d \ll It(d)$, то метод "підгонки" при використанні ефективних засобів збільшення оброблюваного розміру d_i дає можливість управляти кінцевим його значенням.

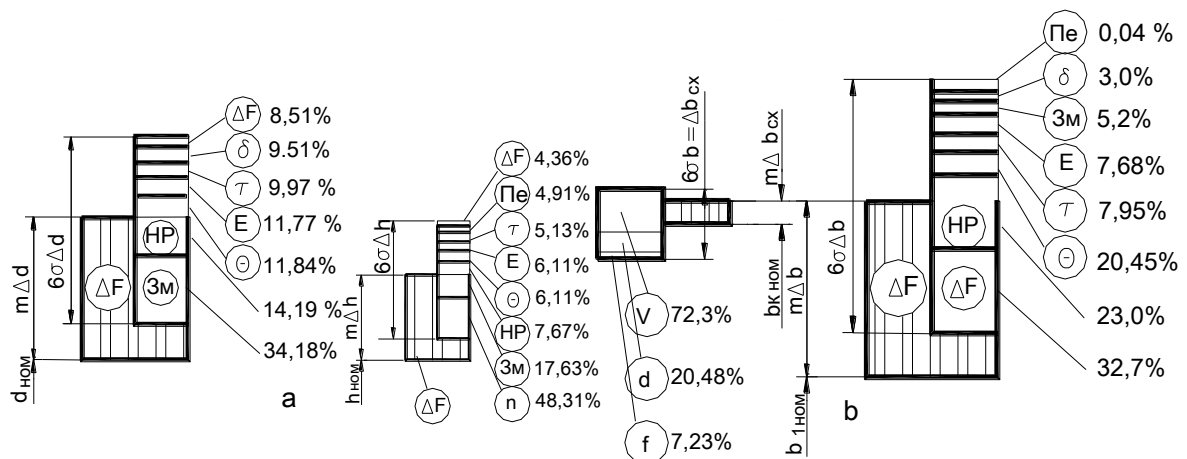


Рис. 18. Структура сумарної похибки діаметру та глибини лунки (а) та ширини різку контурного вирізання отворів (b)

3.3.1 Підвищення ефективності використання теплового джерела в зоні опромінення

Перш, ніж перейти безпосередньо до засобів реалізації запропонованої методики "підгонки" розмірів, можна використати простіші організаційні засоби, які сприяють підвищенню якості обробки шляхом концентрації енергії теплового джерела в заготовці, створеного при лазерному опроміненні. Зазвичай це досягається при оптимізації *режиму опромінення*, хоча в створенні джерела беруть участь обидві сторони процесу: лазерний промінь - постачальник енергії і *тіло заготовки* - її

споживач. Очевидним видається рішення про переміщення операції лазерної обробки в послідовності операцій за операцію термічної обробки (загартування), в результаті якої подрібнюється структура матеріалу і зменшується його теплопровідність [50] і ефективніше використовується накопичене тепло. У разі відсутності операції термообробки в процесі виготовлення виробу її можна застосувати в локальному вигляді - шляхом лазерного опромінення металу в зоні майбутнього розташування оброблюваного розмірного елемента на відповідних режимах. Якщо для формування глибоких порожнин використовується багато імпульсний режим обробки, то необхідно чергувати оброблюючі імпульси з опроміненням в зміцнюючому режимі. Таку послідовність переходів рекомендується виконувати на одній ЛТУ без переустановлення заготовки, використовуючи один і той же режим накачування активного середовища і, подаючи по черзі імпульси випромінювання в режимі вільної генерації (ВГ) - для загартування, і імпульси з модуляцією добротності резонатору - для розмірного формування оброблюваного елемента [51]. Обидва переходи операції прошивки отворів можна сумістити, використовуючи сучасні засоби впливу на режим генерації лазера та на оптичну систему ЛТУ [52]. Перетворення частини променя (центральної) із режиму ВГ у модульований режим досяється розташуванням в резонаторі лазера 1 пасивного затвору 4 (для $\lambda = 1,06 \text{ мкм } LiF: F_2^-$) (рис. 19). При цьому не тільки вирізається найбільш потужна частина променя 5, але й затягується у часі початок його генерації, що додатково підвищує інтенсивність за рахунок скорочення тривалості імпульсу, враховуючи також більш раннє його закінчення. Ця частина променя гостро концентрується лінзою 3 на поверхню заготовки 11 та виконує формування лунки випаровуванням матеріалу з зони опромінення. Периферійна частина променя перетворюється об'єктивом з двох лінз 6 та 3 з фокусною відстанню $F' < F_2$ і попередньо опромінює ділянку в зоні розташування отвору більшого розміру $d_{3m1} > d_{kl}$ в режимі м'якого нагрівання. У час надходження центральної частини променя в матеріалі зони розташування лунки вже виконані термічні дії зі зміненням (подрібненням) його структури, що локалізує зону нагрівання та зменшує відтік тепла. Цим вдається інтенсифікувати процес та зменшити долю розплаву, що підвищує якість результату опромінення. За

необхідністю багато імпульсної обробки чергові імпульси діятимуть в порожнині лунки, збільшуючи її глибину.

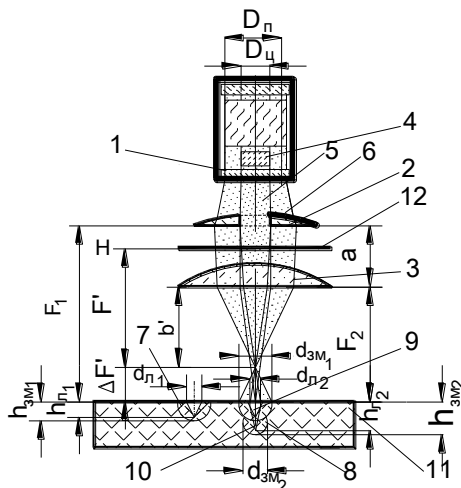


Рис. 19. Схема ЛТУ для обробки точних отворів з одночасною термообробкою матеріалу заготовки в зоні їх розташування:

(1 – лазер, 2 – лінза з отвором, 3 – перетворююча лінза, 4 – пасивний затвор, 5, 6 – центральний та периферійний проміні, 7 і 8 – зона зміцнення першим і другим імпульсом, 9 і 10 – лунка після першого та другого імпульсу, 11 – заготовка, 12 – головна площина системи лінз)

Подібного результату можна досягти при обробці заготовки з матеріалу, що не змінює структуру після термічної дії (наприклад, з чистих металів), застосовуючи механічне її подрібнення в зоні розташування отвору (лунки) за рахунок поверхнево-пластичної дії на її поверхню до лазерного опромінення [53]. Для цього розроблена та використана ЛТУ з деформуючим елементом у вигляді кульки (рис. 20). Промінь від лазера 2-3-4-5 з пасивним затвором 4 також поділяється на центральний 7 та периферійний 6. Перший у скороченому у часі вигляді та з накопиченою енергією накачуванням активного середовища 5 за допомогою пасивного затвору 4 концентрується гостро лінзою – кулькою 9 в зону її контакту з поверхнею заготовки 13. Матеріал кульки 9 - плавлений кварц з $n = 1,5$ з температурою плавлення $T_{пл} \sim 3000^\circ\text{C}$. При достатньому рівні інтенсивності випромінювання в зоні контакту ($> 10^7$ Вт/см²) в товщині заготовки 11 сформується отвір 11 діаметром d_o одним або більшою кількістю імпульсів, але після того, як його периферійна частина 6, сконцентрована системою лінз 8-9 (a) в зоні розташування отвору, але більшого розміру $d_{деф} > d_o$, та з більшою тривалістю імпульсу $\tau_n > \tau_c$ ніж у центрального променя, виконає нагрівання зони обробки, на яку статично діє зусилля пружини 10. Короткочасна дія периферійної частини (~ 3 мс) викличе размягчение стінки заготовки (b) і зусилля пружини стане достатнім для пластичної її деформації з подрібненням структури матеріалу тому, що така дія пружини може вважатися динамічним навантаженням.

3), що дозволяє пристосувати пристрій для роботи з лінзами різних фокусних відстаней, які, в свою чергу) визначаються при рішенні основної задачі, - вибору режиму обробки отвору. Подробиці проектування такого об'єктиву приведені в [46].

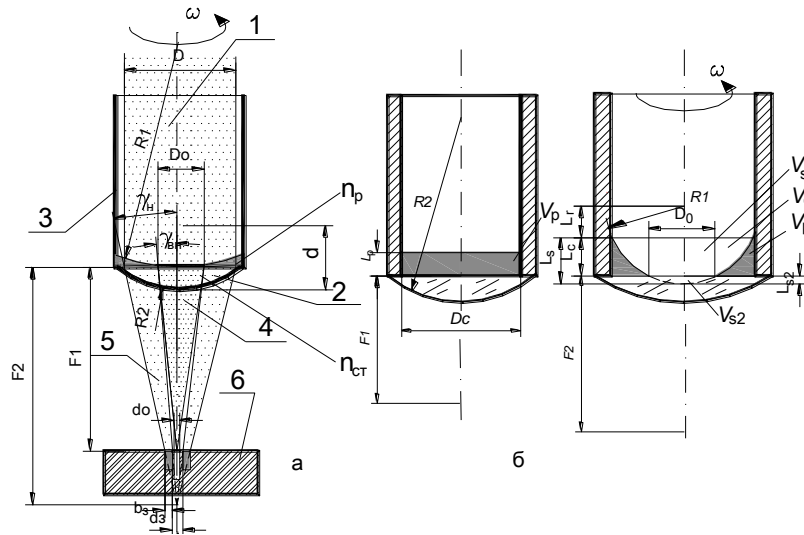


Рис. 21. Оптична система для обробки отвору з тепловою завісою навколо нього. (1 - лазерний промінь, 2 - лінза, 3 - стакан, 4 - каустика центральної частини променя від лінзи 2 (F_1), 5 - каустика периферійного променя від системи лінз 2 і з рідини (F_2), 6 - заготовка).

Для повернення структури матеріалу, що оточує оброблений елемент, в початкову використовується об'ємна термообробка в режимі відпалу (нормалізації) матеріалу.

3.3.2. Оптимальна організація технологічної операції

До принципів недоліків операцій лазерної прошивки отворів відноситься властива їм конусоподібність, яка виникає внаслідок двох причин. Перша - більш тривалий час дії енергії променя на верхні шари матеріалу заготовки та, як слідство, формування вхідної конічної ділянки отвору. Друга причина торкається загальноприйнятої схеми формоутворення отворів, глибина яких перевищує $2d$, з незмінним положенням заготовки в каустиці променя під час обробки і полягає в зменшенні рівня інтенсивності випромінювання на дні отвору у міру його поглиблення.

Усунення або послаблення впливу першої причини досягається оптимізацією рівня імпульсної енергії, необхідної для формування отвору [37], шляхом зменшення тривалості імпульсу. Цю ж мету переслідують пропозиції п. 3.3.1.

Для підтримки незмінного рівня інтенсивності на дні оброблюваного отвору, що зміщується при його поглибленні з розрахункового перерізу каустики променя, використовують декілька прийомів:

- компенсація зменшення інтенсивності внаслідок збільшення діаметру каустики на дні отвору підвищенням рівня імпульсної енергії;
- періодичне впродовж операції прошивки отвору зміна відносного положення оптичного елемента і заготовки на величину приросту глибини отвору (при багатоімпульсній обробці);
- збільшення глибини різкості оптичного елемента (длини Релею) шляхом його заміни на довгофокусний або використання конструкції зі змінюваними властивостями (трансфокатори).

Використання запропонованих методів спричиняє за собою рішення наступних завдань:

- будь-яка з вищеперелічених дій виконується при зміщенні дна отвору за межі глибини різкості оптичного елемента;
- при заглибленні каустики променя в порожнину отвору необхідно виключити її "обрізання" апертурою його вхідної ділянки, наприклад, "загострюючи" її діафрагмуванням променя на рівні головної площини оптичного елемента;
- попередня процедура вимагає збільшення імпульсної енергії для компенсації втрат при "обрізанні" променя діафрагмою;
- при періодичній заміні оптичних елементів на довгофокусні необхідно забезпечувати їх співісність з обробленою частиною отвору;
- оптичні елементи трансфокаторів не повинні знаходитися уздовж осі променя в місцях локальних концентрації його енергії і не можуть бути склеєними: деякі схеми і конструкції трансфокаторів приведені в [55].

В деяких випадках при обробці отвору в заготовці простої форми невеликих розмірів можна зменшити конусоподібність отвору, періодично в перервах між імпульсами зміщуючи її назустріч променю на величину приросту глибини отвору одним імпульсом $\Delta = \Delta h_i$ [56]. Операцію прошивки отвору можна автоматизувати, якщо заготовку 4 у вигляді кульки розташувати в каналі отвору в столі 3, співісного з віссю променя лазера 1 і що має конусність $k = D - d$, причому його розміри пов'язані

з діаметром заготовки d_3 : $D > d_3 > d$. При поданні повітря в отвір меншого розміру d столу 3 під тиском p через вхідну діафрагму 5 розміром d_{ex} заготовка 4 займе положення, яке залежить від її розміру d_3 , ваги G і конусності k . Перед початком обробки лінзу 2 розташовують уздовж осі променя так, щоб вибраний переріз його каустики знаходився на поверхні заготовки 4. Якщо для обробки приходять кульки з розсіянням їх розмірів, то відповідно до балансу сил (від ваги виробу і тиску повітря на його площу), їх розташування відрізнятиметься положенням центру тяжіння ЦТ, а не поверхні, з якою починається обробка, тобто забезпечується постійність початкових умов опромінення $F \pm \Delta F$. При поданні імпульсу випромінювання в заготівлі 4 утворюється лунка розмірами $d_i \times \Delta h_i$, що зменшить її вагу до величини:

$$G'_3 = \pi \times \gamma (d_3^3 / 3 - d_i^2 \times \Delta h_i / 2) / 2$$

(γ - питома вага матеріалу заготовки). Баланс сил, що утримують заготовку в отворі столу :

$$p_1 \times \pi \times d_3^2 / 4 = G_3 = \pi \times d_3^2 \times \gamma / 6$$

(де: p_1 - тиск під заготовкою), визначається витратою повітря через кільцевий проміжок площею $(D_i^2 - d_3^2) \times \pi / 4$ (D_i - діаметр перерізу конусного отвору на рівні розташування заготовки), і вона зміститься вгору назустріч променю на величину $\Delta = \Delta h_i$ доки проміжок навколо неї не досягне значення, при якому тиск p урівноважить нову вагу кульки. Величина переміщення овки Δ залежить від пневматичної характеристики системи наддування повітря (тиску p , діаметру вхідного сопла d_{ex}) і конусності отвору в столі ЛТУ k . Подальші імпульси викликають підйоми заготовки до формоутворення наскрізного каналу отвору, після чого ЛТУ вимикається. Зміщення центру тяжіння (ЦТ) отвору уздовж осі заготовки (ЦТ') гарантує стабільність його кутового положення в отворі столу 3. Таким чином, за умови вибору оптимальної подовжньої форми останнього забезпечується незмінність взаємного положення каустики променя і дна оброблюваного отвору, тобто рівня інтенсивності на ній впродовж процесу обробки, що є гарантією формування циліндричного отвору.

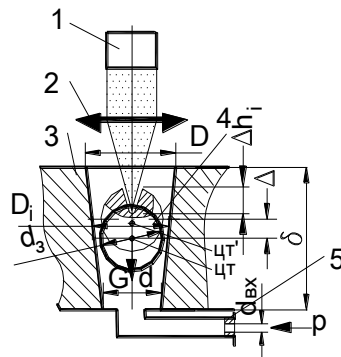


Рис. 22. Схема обробки глибоких отворів в заготовці простої форми (кулька, циліндр, диск)
(1 – лазер, 2 – лінза, 3 – стіл ЛТУ, 4 – заготовка, 5 – вхідна діафрагма)

Подальше підвищення якості отворів може бути досягнуте за умови зменшення кількості розплаву в її порожнині під час обробки, а головне, в її кінці, що б виключити неконтрольований його вплив на поздовжню форму та розміри обробленого отвору внаслідок перерозподілу рідини під дією сил тяжіння, поверхневого натягнення та ефекту змочування рідиною твердого матеріалу. При газолазерній обробці (частіше розрізанні) розплав із порожнини оброблюваного елемента (різу) видаляється струменем газу (специфічним за розмірами, тиску і швидкістю), але при розмірній обробці оброблений елемент може бути ненаскрізним, а при багатоімпульсній обробці наскрізних отворів лише останні імпульси випромінювання формують наскрізний його канал, хоча накопичення розплаву в ньому починається з першого імпульсу. Більш ефективною при формуванні лунок та пазів і наскрізних елементів (отворів, різів) виявилася лазерна обробка, комбінована з ультразвуковим струшуванням крапель розплаву із зони опромінювання [57]. ЛТУ для виконання такої операції (рис. 23) утримує лазер 1 та оптичну систему 2 у вигляді лінзи, яка розташована в різаку 3 у вигляді усіченого пустотілого конусу із соплом 5 для направлення струменя газу в зону опромінювання. Різак зі сторони більшого розміру жорстко з'єднано із набірним осердям 9 із магнітострикційного матеріалу, наприклад, пермендюрій, який розміщено в катушці електромагніту 4, тобто котушка, осердя та різак створюють ультразвукову головку, причому різак має роль акустичного трансформатора швидкості, що дозволяє збільшувати амплітуду скорочень довжини осердя (1...8 мкм) в коливання торця сопла 5 з амплітудою, більшою ніж вихідна в

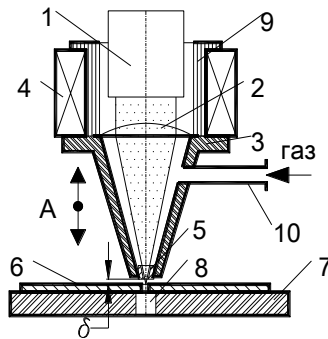


Рис. 23. Сема ЛТУ для лазерної обробки при ультразвуковому струшуванню заготовки (1 – лазер, 2 - лінза, 3 – різак, 4 – котушка електромагніту, 5 – сопло, 6 – заготовка, 7 – стіл ЛТУ, 8 – отвір в столі, 9 – осердя із магнітострікційного матеріалу, 10 – штуцер)

стільки разів, скільки площа тіла різьки в контакті з осердям 9 більше площі вільного його торця (~ 100 мкм). Якщо зазор δ між торцем різьки 5 та поверхнею заготовки 6 буде менше амплітуди коливань першого, то його удари будуть коливати заготовку з частотою до 20 кГц та стягувати частки матеріалу із порожнини отвору (тверді та рідкі), виключаючи формування на його стінках застиглих крапель, а на нижній крайці – дросу.

3.3.3. Адаптивна форма організації операції прецизійної обробки

Формування отвору в режимі підгонки його розміру в межі поля допуску можливо лише за наявності оперативної інформації про поточний його рівень. Другою умовою успішної реалізації такої технологічної операції є передбачена можливість управління кроком приросту розміру оброблюваного отвору в заготовці. При проектуванні і реалізації операції необхідно враховувати розміри, форму і матеріал заготовки, кількість отворів в ній, а вибрана ЛТУ повинна відповідати вибраним методам управління процесом обробки або допускати модернізацію відповідного змісту. Принцип управління поточним розміром оброблюваного отвору заснований на відомих його залежностях від режиму опромінення. Так, для обробки отвору в суцільному матеріалі потрібне таке поєднання параметрів лазерного променя і умов опромінення, при якому в межах площі оброблюваного елемента досягається інтенсивність, достатня для обраного механізму його формування. Для збільшення поточного розміру отвору d (до деякої межі) можна використати додаткові імпульси випромінювання з колишніми або зміненими параметрами (частіше енергетичними) за незмінних умов опромінення (для заготовок завтовшки $\delta \geq 2d$), а для тонких заготовок - шляхом збільшенням поперечного розміру каустики променя в межах товщини заготовки $d_{i+1} > d_i$. Для формоутворення отвору в заготовці

простої форми досить великої товщини (по відношенню до його діаметру) можна використати пристрої, зображені на рис. 24 [58, 59].

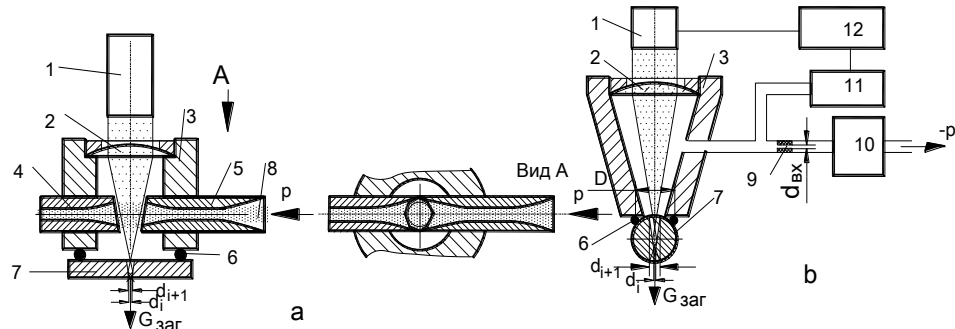


Рис.24. Схеми ЛТУ з пристроями для контролю поточного розміру отвору по витрату повітря через його переріз.

(1 - лазер, 2 - лінза, 3 - корпус, 4 - сопло приймальне, 5 - сопло напірне, 6 - ущільнення, 7 - заготовка, 8 – стиснуте повітря, 9 - дросель, 10 - вакуум-насос, 11 - датчик тиску, 12 - блок живлення лазера).

Для цього з метою підвищення точності оброблених отворів над заготовкою 7 в герметизованому корпусі 3 (рис. 24а) створюється вакуум ежекторною дією струменю повітря 8 із сопла 5 в сопло 4, завдяки якому заготовка 7 утримується притиснутою до ущільнення 6 на розрахованій відстані відносно лінзи 2. Після формування наскрізного каналу отвору в ній серією імпульсів повітря підсмоктується в порожнину корпусу 3, що зменшує вакуум і при досягненні його заданого рівня, тобто, коли розмір отвору d_i досягне нижньої межі поля допуску, тиск у довкіллі не зможе утримувати заготовку 7 біля ущільнення 6 і вона відпаде. Інша ЛТУ (рис. 24б) також доробляє отвір до заданого, але вакуум створюється в порожнині корпусу 3 відкачуванням повітря вакуум насосом 10 через вхідну діафрагму 9 (дросель).

Для заготовок подібної форми і розмірів, з одним отвором, але в тонкій стінці ($\delta < 2d$) підгонка його розміру до межі поля допуску збільшенням енергії імпульсів, що допрацьовують, або їх кількості не дає позитивних результатів. У ЛТУ [60] застосовується принцип керованого збільшення розміру інструменту, причому в режимі плавного зменшення кроку приросту у міру наближення до нижньої межі поля допуску розміру отвору. Вона (рис. 25) може використовуватися для обробки системи однакових за розміром отворів в листових заготовках (сито, водоохолоджувані стінки турбін, компресорів).

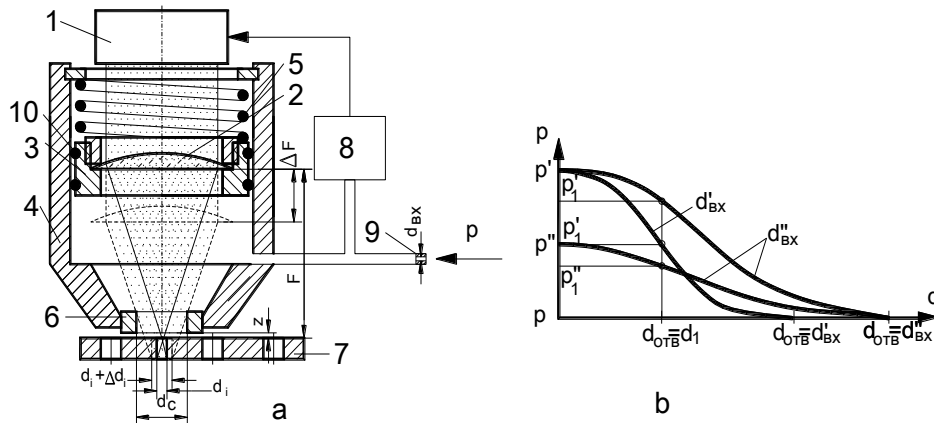


Рис. 25. Схема ЛТУ з пристроєм для адаптивної організації операції обробки отворів(*a*), пневматична характеристика системи(*b*).

(1 - лазер, 2 - лінза, 3 - оправка-поршень, 4 - корпус-пневмоциліндр, 5 - пружина, 6 - сопло, 7 - заготовка, 8 - датчик тиску, 9 - вхідна діафрагма).

Лінза 2 (рис. 25 *a*) в оправці 3 у вигляді поршня пневматичного циліндра 4 з ущільненнями 10 встановлена з можливістю переміщення уздовж осі променя лазера 1 в корпусі 4, причому її положення визначається зусиллям дії пружини 5 і тиском під нею повітря, яке подається через вхідну діафрагму 9 розміром $d_{вх}$. На початку операції, коли заготовка 7 розташована навпроти осі променя на відстані Z від торця сопла 6, а стисле повітря з корпусу 4 виходить через отвір діаметром d_c його витрата визначається площею бічного проміжку $S = \pi \times d_c \times Z$. Після формування наскрізного каналу отвору діаметром d_i тиск в корпусі 4 зменшується в результаті додаткового витікання повітря через канал отвору площею $\Delta S = \pi \times d_i^2 / 4$, що порушує рівновагу сил, діючих на поршень 3 і пружина 5 зміщує лінзу 2 на величину ΔF , тобто змінює умови опромінення і розмір каустики в отворі. Вибираючи відповідні значення тиску повітря p і розміру вхідної діафрагми $d_{вх}$, можна використати відповідну ділянку характеристики пневматичної системи (рис. 25*b*), в межах якої передатне число між ΔF і d_i повинне змінюватися таким чином, щоб забезпечити плавне збільшення розміру отвору до нижньої його межі допуску. Видно, що передатне число може змінюватися розміром вхідної діафрагми та рівнем тиску p у пневматичній вимірювальній системі.

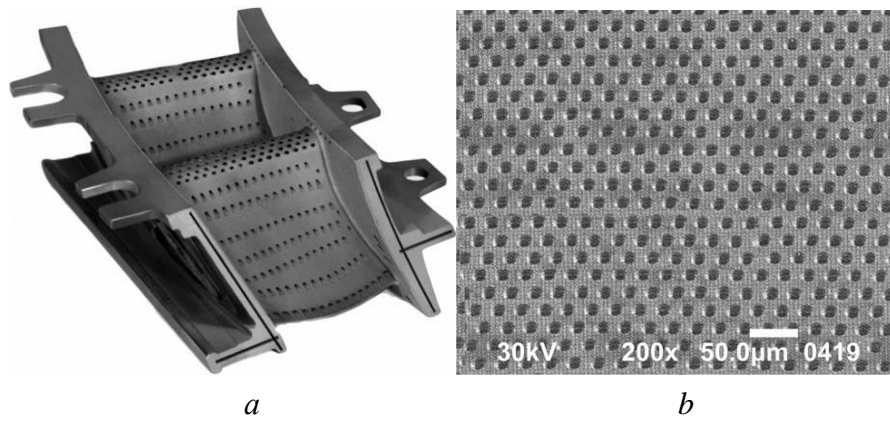


Рис. 26. Зразки результатів свердління лазерним променем охолоджувальних отворів у лопатці Газо турбінного двигуна (*a*) та в ситі (*b*) завтовшки 0,03 мм

Приклади виконаних операцій прецизійної лазерної обробки наведено на рис.26.

Висновки

1. Головною спонукальною причиною підготовки цієї роботи є відсутність у світовій практиці систематизованих керівних або консультативних даних по практичному проектуванню операцій лазерної обробки в усьому їх різноманітті, хоча лазерній технології вже більше 50 років. Досвід впровадження результатів розробок технологічної операції, з вирішенням головного завдання – пошук режимів обробки показав, що завжди ця задача перетворюється в самостійне науково – пошукове дослідження процесу обробки та його математичного моделювання з використанням складних методик та лабораторних приладів. В своїй роботі ми спробували спростити цю задачу до інженерного рівня і цей досвід може бути корисним фахівцям певного круга і кваліфікації.
2. Простота і одночасна складність підготовки і виконання запланованих завдань дисертації пов'язані з тим, що хоча існують розроблені методики рішення простих

і системних технологічних завдань, які повністю задовольняють їх різноманіттю, проте, використання у виробничій практиці вимагає від фахівців певних навичок і знань. Не кожне підприємство або фірма має у своєму штаті відповідних технологів або механіків, не скрізь є необхідне лабораторне і наукове устаткування тим паче, що проблема проектування не цікавить наукових співробітників, тому що ця процедура не несе нових академічних знань.

3. У основі виконаної роботи використані найбільш прості методики пошуку режимного забезпечення технологічних операцій шляхом тимчасового виключення з показників, що беруться до уваги при проектуванні за якісними характеристикам, такими, як точність розмірів, форми і розташування оброблюваних елементів виробу, якості їх поверхні. До них відносяться наближені методики чисельних рішень теплових полів для різних видів операцій, причому деякі з них для певних завдань доведені до алгебраїчних рівнянь.
4. Природно, таке спрощення етапу технологічної підготовки виробництва не дозволяє виконати вимоги якості, викладені в ТЗ на проектування. Тому другою складовою частиною проектування є методи і засоби додаткового, часто не режимного вдосконалення технологічної операції, які, використовуючи дані першого етапу проектування, пропонують інші шляхи досягнення більш високих рівнів показників. До них відносяться методи оптимізації процесу виконання операції і стабілізації на цій основі результатів, наприклад, рівня поглиненої енергії, оптимального використання теплового джерела, створеного в результаті опромінення, методи феноменологічного дослідження процесів, відповідальних за результат, для їх корекції по зовнішніх проявах процесу. Корисним виявилось застосування автоматизованих засобів отримання кінцевих результатів, особливо, при адаптивній формі організації операції.
5. Виконані розробки дозволили досягти поставленої мети - оперативного технологічного забезпечення операцій лазерної обробки - використовуючи аналітичне моделювання процесів обробки і додаткове вдосконалення операцій використанням спеціального технологічного оснащення.

Використані джерела

1. Зайченко Ю.П. *Дослідження операцій*. Київ: Видавничий дім «Слово», 2006. 816 с.;
2. Новик Ф.С., Арсов Я.Б. *Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов*. Москва: Машиностроение, 1980. 304 с.;
3. Котляров В.П. *Технологія лазерної обробки*. Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2010. С. 26-28;
4. Kotlyarov V.P., Konovalenko Yu.V., Dubnyuk V.L., Kozyrev A.S. Analysis of the sizing error structure of laser profiling. *Surf Eng Appl Elect.* 1996, (1), 1-6;
5. Kotlyarov V.P., Konovalenko Yu.V., Dubnyuk V.L., Kozyrev A.S. Quantitative analysis of the total error of dimensional results of laser profile cutting operations. *Surf Eng Appl Elect.* 1996, (2), 1-6;
6. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюра Н.И. *Технологические процессы лазерной обработки*. М.: МГТУ им. Баумана, 2008. 233-323; 523-548;
7. Вейко В.П. *Лазерная микрообработка*. СПб.: ГУ ИТМО, 2007. 111 с.;

8. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В. *Лазерная и электроннолучевая обработка материалов* Москва: Машиностроение, 1985. 496 с.;
9. Коваленко В.С., Головки Л.Ф., Черненко В.С. *Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера*. Киев: Техніка, 1990. 192 с.
10. Андрияхин В.М., Майоров В.С., Якунин В.П. Расчет поверхностной закалки железоуглеродистых сплавов с помощью CO₂ - лазера непрерывного действия. *Поверхн. Физ., хим., механика*. 1983, (6), 140-147;
11. Веденов А.А., Гладуш Г.Т. *Физические процессы при лазерной обработке материалов*. Ленинград: Машиностроение, 1986. 216 с.;
12. Коваленко В.С., Романенко В.В., Олещук Л.М. *Малоотходные процессы резки*. – Киев: Техніка, 1987. 112 с.;
13. Самойлович Г.С. *Гидрогазодинамика*. Москва: Машиностроение. 1990. 180 с.;
14. Уляков П.И. Некоторые закономерности разрушения твердых сред излучением ОКГ. *ЖЭТФ*. 1967, **52**(3), 821-831;
15. Коваленко В.С. Определение оптимальных режимов получения отверстий микронных размеров сфокусированным лучом лазера. *Технология и организация производства*. 1968, (3), 86-89;
16. Вакс.Е.Д. *Технология обработки деталей машин световым лучом*. Москва: Машиностроение, 1974. 32 с.;
17. Тархов Г.Н. Световая лучевая обработка материалов. Тула: Сб. ТПИ: *Электрохимические и электрофизические методы обработки материалов*. 1967, (31-43);
18. Satoshi N., Yasunao S., Kiichi T. Laser machining of thin film. *Bull.Jap.Soc.Precis.Eng.* 1971 **5** (2), 39-42;
19. Вейко В.П., Либенсон М.Н. *Лазерная обработка*. Ленинград: Лениздат, 1973. 192 с.;
20. Лобов Б.Я., Соболев Э.Н. Развитие тепловой модели лазерного разрушения материалов. Сб.: *Воздействие концентрированных потоков энергии на материалы*. Москва: Наука. 1985. 248 с.;
21. Суминов В.М., Промыслов Е.В., Скворчевский А.К., Кузин Б.Р. *Обработка деталей лучом лазера*. Москва: Машиностроение. 1969. 196 с.;
22. Котляров В.П., Коваленко В.С., Дятел В.П. *Справочник по технологии лазерной обработки*. Киев: Техніка, 1985. 168 с.;
23. Kotlyarov V.P., Leleka S.V., Nidal Z. Instability sources of laser machining operation dimensions characteristic. *Surf Eng Appl Elect.* 1999, (2), 1-6;
24. Котляров В.П., Коваленко В.С., Снегс В.Л. Лазерная размерная обработка в дизелестроении. *Труды ЦНИДИ*. 1979 (75), 144-155;
25. Котляров В.П., Сергієнко М.І., Нідаль Зухаїр, Богданова О.В. Нестабільність розмірів шару лазерного зміцнення деталей гірничих машин. *Вісник КПІ серія «Гірництво»*. 2000 (2), 81-86;
26. Котляров В.П., Ворончак Т.П., Дубнюк В.Л. Застосування штучних нейронних мереж для прогнозування якісних показників операцій лазерної обробки. *Вісник НТУУ «КПІ» серія «Машинобудування»*. 2015 (3), 104-114;
27. Бродский В.С. *Введение в факторное планирование эксперимента*. Москва: Наука, 1976. 224 с.;

28. Басс М.Я., Тютюнников В.И. Использование математического планирования эксперимента при разработке технологического процесса поверхностного упрочнения деталей лазером. *Рук., деп. в Союзтехноприбор, DP1085*. 1979, 9 с.;
29. Киященко О.М., Котляров В.П. Спрощений алгоритм проектування операцій лазерної обробки. *Матеріали XVIII Міжнародної науково-технічної конференції „Прогресивна техніка, технологія та інженерна освіта” Секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології»*, м. Київ, 29 червня 2017.- Київ: НТУУ «КПІ».-2017.-С. 341 – 344.
30. Постригань Ю.В., Дубнюк В.Л. Компания TRUMPF: технологии комплексной обработки листового металла. *Оборудование и инструмент для профессионалов*. 2008 (2), 30-33;
31. Котляров В.П., Дубнюк В.Л., Худякова О.П. Результати застосування чисельних методів вирішення рівняння теплопровідності при проектуванні операцій лазерної поверхневої обробки деталей друкарських верстатів . *Технологія і техніка друкарства (ВП) НТУУ «КПІ»*. 2014 (4),- рис. 1, 2;
32. Ницаль Зухайр. *Технологическое обеспечение операций лазерной контурной резки*. Автореф. дис. канд. техн. наук. Киев., 2001. 17 с.;
33. Самарский А.А. Николаев Е.С. *Методы решения сеточных уравнений*. Москва: Наука, 1978. 306 с.;
34. Самойлович Г.С. *Гидро–газодинамика*. Москва: Машиностроение, 1990. 180 с.;
35. Котляров В.П., Лавріненков Е.О. Спосіб визначення режиму лазерного різання заготовок різної товщини. UA пат. 58166, 2011. Бюл. № 7. 3 с.;
36. Вакс, Е.Д., Миленський М.Н., Сапрыкин Л.Г. *Практика прецизионной лазерной обработки*. Москва: Техносфера, 2013. рис. 6.8;
37. Steffen J. Prozessoptimierung blakus materialabtragenden bearbeitungs problemen ar Lasertrahlung. *Teinverktechn. un messtechn.* 1979 **87**, (7), 309-320;
38. Куликовская Н.И. *Применение системы Галилея для плавного изменения расходимости пучка, излучаемого ОКГ*. ОМП, 1975, (12), 19-21;
39. Котляров В.П., Дубнюк В.Л. Спосіб обробки матеріалів лазерним випромінюванням. UA пат. 103184, 2015. Бюл. № 23.;
40. Котляров В.П., Дубнюк В.Л. Лазерна установка для опромінення поверхні заготовки. UA пат. 106618, 2015. Бюл. № 8. 3 с.;
41. Котляров В.П., Юрченко Д.В. Лазерний пристрій для обробки отворів без вхідного конусу та ґрату. UA пат. 87045, 2013. Бюл. №2. 3 с.;
42. Котляров В.П., Шепелев М.В. Установка для лазерної обробки. UA пат. 98649 від 30.05.2014, 2015, Бюл. № 9,
43. Котляров В.П., Дубнюк В.Л., Ткачук М.В. Пристрій для перетворення пучка лазерного випромінювання. UA пат. 86594, 2014. Бюл. № 1. 3 с.;
44. Котляров В.П., Процак О.М. Спосіб візуального фокусування оптичних систем на об'єкт. UA пат. 75096, .2012, Бюл. № 22. 3 с.;
45. Котляров В.П., Аливерди А. Пристрій для лазерної обробки. UA пат. 41613, 2009. Бюл № 10 3 с.;
46. Котляров В.П. *Технологічне оснащення лазерних комплексів*. Київ: НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського», 2013. 592 с.;
47. Котляров В.П., Савіна Л.М., Дубнюк В.Л.. Установка для газолазерного різання листових заготовок. UA пат. 103137, 2015, Бюл. № 23. 3 с.;

- 48.Котляров В.П., Данилейко О.О., Дубнюк В.Л.. Спосіб газолазерного різання заготовок із горючих матеріалів. UA пат. 100324, 2015, Бюл. №14. 3 с.;
- 49.Котляров В.П., Киященко О.М. Технологічна установка для трепанації отворів лазерним променем. UA пат. 119174, 2017, Біл. № 17. 3 с.;
- 50.Котляров В.П., Спосіб лазерної обробки отворів в металевих заготовках. UA пат. 42516, 2009, Бюл. №13. с. 3;
- 51.Котляров В.П., Пристрій для лазерної обробки отворів в металевих виробках UA пат. 42519, 2009, Бюл. №13. с. 3;
- 52.Котляров В.П., Ситник Я.А. Пристрій для обробки поверхонь тертя лазерним зміцненням. В.П. Котляров, П.А. Киричок. UA пат. 87370, 2014, Бюл. № 3, 3 с.;
- 53.Киященко. О.М., Котляров В.П. Спрощений алгоритм проектування операцій лазерної обробки (подовження). *Матеріали всеукраїнської науково-технічної конференції молодих вчених та студентів «Інновації молоді – машинобудуванню», Секція «Лазерна техніка та фізико-технічні технології», м. Київ, 14 червня 2018.-Київ: НТУУ «КПІ».-2018.-С. XXX-XXX. ;*
- 54.Котляров В.П., Короткий Д.В. Об'єктив для лазерної обробки. UA пат. 74855, 2012. Бюл. № 21. 3 с.;
- 55.Котляров В.П., Короткий .В. Трансфокатори для операцій лазерної обробки в поліграфії. *Технологія і техніка друкарства. (ВП) НТУУ «КПІ».- 2012.- №1.- С.48-60;*
- 56.Котляров В.П., Петренко М.Д.. Установка для лазерної обробки отворів. UA пат. 113544, 2017. Бюл. № 3. 3 с.;
- 57.Котляров В.П., Киященко О.М. Лазерна установка для комбінованої з ультразвуком обробки отворів. UA пат. 119175, 2017. Бюл. № 17. 3 с.;
- 58.Котляров В.П., Гладченко О.В. Пристрій для лазерної обробки. UA пат. 99407, 2015. Бюл. № 11. 3 с.;
- 59.Котляров В.П., Спаська О.О. Спосіб лазерної обробки отворів. UA пат. 103189, 2015. Бюл. № 23. 3 с.;
- 60.Котляров В.П., Тарасюк А.С. Установка для обробки отворів лазерним променем в листових заготовках. UA пат. 2017. Бюл. № 24. 3 с.

Додатки

ДодатокА

Листінг програми рахування теплової задачі.

```

program teplo;
uses coeff,ray,general;
const max_deflection = 0.1; (* maximum deflection, K *)
var gamma,beta:array[1..20] of real; (* array of factor *)
    tmp_heat_array,tmp1_heat_array:array[0..760] of real;
    x1,x2,x3:word;
    f:text;
(* температура на границе *)
function heat_0_b_c(y1,y2:word;num_coor:byte;heat:real):real;
begin
case num_coor of

```

```

1:begin
  {y1 - x}
  {y2 - y}
  if ray_present(y1,y2) then
    heat_0_b_c := heat+(1-r(y1,y2,0,heat))*
      wp(y1*h,y2*h)*h/lambda(y1,y2,0,heat)
      {тепловой поток}
  else
    if from_erase_array(y1,y2,0) = 1 then
      heat_0_b_c := temperature_erase
    else
      heat_0_b_c := heat+alfa(y1,y2,0,heat)*(t_0-heat)*h/lambda(y1,y2,0,heat);
    end;
  end;
2:begin
  {y1 - y}
  {y2 - z}
  if from_erase_array(0,y1,y2) = 1 then
    heat_0_b_c := temperature_erase
  else
    heat_0_b_c := heat+alfa(0,y1,y2,heat)*(t_0-heat)*h/lambda(0,y1,y2,heat);
  end;
end;
3:begin
  {y1 - z}
  {y2 - x}
  if from_erase_array(y2,0,y1) = 1 then
    heat_0_b_c := temperature_erase
  else
    heat_0_b_c := heat+alfa(y2,0,y1,heat)*(t_0-heat)*h/
lambda(y2,0,y1,heat);
  end;
end;
end;
function heat_L_b_c(y1,y2:word;num_coor:byte;heat:real):real;
begin
  case num_coor of
    1:begin
      {y1 - x}
      {y2 - y}
      if from_erase_array(y1,y2,amount_step[3]) = 1 then
        heat_L_b_c := temperature_erase
      else
        heat_L_b_c := heat+alfa(y1,y2,amount_step[3],heat)*(t_0-heat)*h/
          lambda(y1,y2,amount_step[3],heat);
      end;
    2:begin
      {y1 - y}
      {y2 - z}
      if from_erase_array(amount_step[1],y1,y2) = 1 then
        heat_L_b_c := temperature_erase
      else
        heat_L_b_c := heat+alfa(amount_step[1],y1,y1,heat)*(t_0-heat)*h/
          lambda(amount_step[1],y1,y1,heat);
      end;
    3:begin
      {y1 - z}

```

```

    {y2 - x}
    if from_erase_array(y2,amount_step[2],y1) = 1 then
        heat_L_b_c := temperature_erase
    else
        heat_L_b_c := heat+alfa(y2,amount_step[2],y1,heat)*(t_0-heat)*h/
            lambda(y2,amount_step[2],y1,heat);
    end;
end;
end;
end;

procedure determination_temperature;
var    a_i,b_i,c_i,f_i:real;
        error_determinations:boolean;
        m1,m2,m3:byte;
        tau_step:real;
        i:word;
procedure direct_move(num_coor:byte);
var    heat_minus_halt, (* T(i-1/2) *)
        heat_plus_halt:real; (* T(i+1/2) *)
        i:word;
        m:real;
procedure factor(i:word);
begin
    heat_minus_halt := (tmp_heat_array[i]+tmp_heat_array[i-1])/2;
    heat_plus_halt := (tmp_heat_array[i]+tmp_heat_array[i+1])/2;
    f_i := tau_step/(C(x1,x2,x3,tmp_heat_array[i])*
        ro(x1,x2,x3,tmp_heat_array[i])*h*h);
    b_i := lambda(x1,x2,x3,heat_plus_halt)*f_i;
    a_i := lambda(x1,x2,x3,heat_minus_halt)*f_i;
    c_i := 1+b_i+a_i;
    case num_coor of
        3:f_i := from_heat_array(x1,x2,i);
        1:f_i := from_heat_array(i,x1,x2);
        2:f_i := from_heat_array(x2,i,x1);
    end;
end;
end;
begin
    gamma[1] := 0;
    beta[1] := heat_0_b_c(x1,x2,num_coor,tmp_heat_array[0]);
    for i := 2 to amount_step[num_coor] do
        begin
            factor(i-1);
            m := c_i-a_i*gamma[i-1];
            gamma[i] := b_i/m;
            beta[i] := (a_i*beta[i-1]+f_i)/m;
        end;
    end;
end;
procedure flyback(num_coor:byte);
var    heat:real;
        i:word;
begin
    tmp_heat_array[amount_step[num_coor]] :=
        heat_L_b_c(x1,x2,num_coor,
            tmp_heat_array[amount_step[num_coor]]);
    for i := amount_step[num_coor] downto 1 do

```

```

    tmp_heat_array[i-1] := gamma[i]*tmp_heat_array[i]+beta[i];
end;
begin
m1 := 0;m2 := 1;m3 := 2;
for i := 1 to amount_coor do
begin
tau_step := i*tau/amount_coor;
m1 := m1+1;m2 := m2+1;m3 := m3+1;
if m3 = 4 then
m3 := 1;
if m2 = 4 then
m2 := 1;
for x1 := 0 to amount_step[m1] do
for x2 := 0 to amount_step[m2] do
begin
for x3 := 0 to amount_step[m3] do
case m3 of
3:tmp_heat_array[x3] := from_heat_array(x1,x2,x3);
1:tmp_heat_array[x3] := from_heat_array(x3,x1,x2);
2:tmp_heat_array[x3] := from_heat_array(x2,x3,x1);
end;
(* прямой ход *)
direct_move(m3);
(* обратный ход *)
flyback(m3);
repeat
error_determinations := false;
for x3 := 0 to amount_step[m3] do
tmp1_heat_array[x3] := tmp_heat_array[x3];
(* прямой ход *)
direct_move(m3);
(* обратный ход *)
flyback(m3);
for x3 := 0 to amount_step[m3] do
if abs(tmp1_heat_array[x3] - tmp_heat_array[x3]) >
max_deflection then
error_determinations := true;
until not(error_determinations);
for x3 := 0 to amount_step[m3] do
begin
case m3 of
3:in_heat_array(x1,x2,x3,tmp_heat_array[x3]);
1:in_heat_array(x3,x1,x2,tmp_heat_array[x3]);
2:in_heat_array(x2,x3,x1,tmp_heat_array[x3]);
end;
if m1 = 3 then
if tmp_heat_array[x3] >= temperature_erase then
in_erase_array(x2,x3,x1,1);
end;
end;
end;
end;
begin
begin_work;
(* начальная температура *)

```

```

time := 0;
for x1 := 0 to amount_step[1] do
  for x2 := 0 to amount_step[2] do
    for x3 := 0 to amount_step[3] do
      begin
        in_heat_array(x1,x2,x3,T_0);
        in_erase_array(x1,x2,x3,0);
      end;
    end;
  end;
  (* определение температуры *)
  time := time + tau;
  while time <= time_operation do
    begin
      writeln('current time of operations = ',time:3:3);
      coordinates_center_ray;
      determination_temperature;
      time := time + tau;
    end;
  end;
  assign(f,'ttt');
  rewrite(f);
  for x1 := 0 to amount_step[1] do
    begin
      for x2 := 0 to amount_step[2] do
        begin
          for x3 := 0 to amount_step[3] do
            write(f,from_heat_array(x1,x2,x3):3:2,' ');
            writeln(f, ' ');
          end;
          writeln(f,'-----');
        end;
      end;
    end;
  close(f);
  end_work;
end.

```

```

unit ray;
interface
  procedure coordinates_center_ray;
  function ray_present(x,y:real):boolean;
  function wp(x,y:real):real;
implementation
uses    general;
var    x_ray,y_ray:real;
  procedure coordinates_center_ray;
  const  v=1000/60;(* скорость движения пучка, мм/с*)
  begin
    x_ray := time*v;
    y_ray := sizes_page[2]/2;
  end;
  function ray_present(x,y:real):boolean;
  begin
    if (x_ray-x)*(x_ray-x)+(y_ray-y)*(y_ray-y) <= d_ray/2 then
      ray_present := true
    else
      ray_present := false;
    end;
  function wp(x,y:real):real;{плотность мощности в Вт/мм^2}
  begin
    wp := P/(pi*d_ray*d_ray/4);
  end;
End.(*ray*)

```

```

unit general;
interface
const amount_coor=3;(* amount of coordinate *)
  sizes_page:array[1..amount_coor] of real = (76,76,2);
  (* sizes of page, мм*)
  amount_step:array[1..amount_coor] of word = (760,760,20);
  (* amount of step *)
  delta_temperature:real = 5;
  temperature_fase:real = 1583;(*в градусах*)
  temperature_erase:real = 1900;(*в градусах*)
  time_operation=0.0000005; (* time of operation, с *)
  tau=0.0000001; (* step on time, с *)
  T_0:real=20; (* initial temperature, в градусах *)
  L_melting=15.5*1000/55.847;(* скрытая теплота плавления, Дж/кг*)
  d_ray=0.5;(* диаметр пучка на поверхности заготовки, мм *)
  P = 1500;(* мощность излучения, Вт*)
  max_deflection = 0.1;
  (* maximum deflection, K *)
var  heat_array:array[0..760,0..20] of pointer;
  (* array of temperatures *)
  erase_array:array[0..760,0..20] of pointer;
  (* X x Y x Z *)
  x_ray_min,x_ray_max,y_ray_min,y_ray_max:real;
  time:real;
  h:real; (* step on coordinate, mm *)
procedure begin_work;
procedure end_work;
procedure in_heat_array(x1,x2,x3:word;t:real);
function from_heat_array(x1,x2,x3:word):real;
procedure in_erase_array(x1,x2,x3:word;t:byte);
function from_erase_array(x1,x2,x3:word):byte;
implementation
var i,l:word;
procedure begin_work;
begin
  h := round(sizes_page[1]/amount_step[1]*10)/10;
  for i := 0 to amount_step[1] do
    for l := 0 to amount_step[3] do
      begin
        getmem(heat_array[i,l],(amount_step[2]+1)*6);
        getmem(erase_array[i,l],amount_step[2]+1);
      end;
    end;
  end;
procedure end_work;
begin
  for i := 0 to amount_step[1] do
    for l := 0 to amount_step[3] do
      begin
        freemem(heat_array[i,l],(amount_step[2]+1)*6);
        freemem(erase_array[i,l],amount_step[2]+1);
      end;
    end;
  end;
procedure in_heat_array(x1,x2,x3:word;t:real);
begin
  move(t,mem[seg(heat_array[x1,x3]^):ofs(heat_array[x1,x3]^)+x2*6],6)

```

```
end;
function from_heat_array(x1,x2,x3:word):real;
var t:real;
begin
  move(mem[seg(heat_array[x1,x3]^):ofs(heat_array[x1,x3]^)+x2*6],t,6);
  from_heat_array := t;
end;
procedure in_erase_array(x1,x2,x3:word;t:byte);
begin
  move(t,mem[seg(erase_array[x1,x3]^):ofs(erase_array[x1,x3]^)+x2],1)
end;
function from_erase_array(x1,x2,x3:word):byte;
var t:byte;
begin
  move(mem[seg(erase_array[x1,x3]^):ofs(erase_array[x1,x3]^)+x2],t,1);
  from_erase_array := t;
end;
end.
```

```

unit coeff;
interface
function c(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
function ro(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
function lambda(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
function r(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
function alfa(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
implementation
uses general,general1;
const amount_el_array_c = 41;
      amount_el_array_ro = 41;
      amount_el_array_lambda = 25;
      amount_el_array_r = 25;
      amount_el_array_alfa = 41;
c_array:array[1..5,1..amount_el_array_c] of real = (
(0.000000000,50.000000000,100.000000000,150.000000000,
200.000000000,250.000000000,300.000000000,350.000000000,
400.000000000,450.000000000,500.000000000,550.000000000,
600.000000000,650.000000000,700.000000000,750.000000000,
800.000000000,850.000000000,900.000000000,950.000000000,
1000.000000000,1050.000000000,1100.000000000,1150.000000000,
1200.000000000,1250.000000000,1300.000000000,1350.000000000,
1400.000000000,1450.000000000,1500.000000000,1550.000000000,
1600.000000000,1650.000000000,1700.000000000,1750.000000000,
1800.000000000,1850.000000000,1900.000000000,1950.000000000,
2000.000000000),
(63.100000000,62.800000000,60.200000000,57.700000000,
55.600000000,53.000000000,50.900000000,48.500000000,
46.500000000,43.500000000,41.000000000,39.400000000,
37.400000000,36.000000000,34.000000000,31.900000000,
30.100000000,27.700000000,27.200000000,27.200000000,
27.700000000,28.000000000,28.500000000,29.300000000,
29.800000000,30.300000000,30.800000000,31.300000000,
31.800000000,32.300000000,32.800000000,33.300000000,
30.300000000,30.300000000,30.300000000,30.300000000,
30.300000000,30.300000000,30.300000000,30.300000000,
30.300000000),
(5.000000000,0.006321429,-0.030642857,-0.057750000,
-0.044357143,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,0.000000000,-0.000739286,0.000197143,
0.000070714,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),

```

```
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,-0.000004929,0.000006243,-0.000000843,
-0.000000471,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000);
ro_array:array[1..5,1..amount_el_array_ro] of real = (
(0.000000000,50.000000000,100.000000000,150.000000000,
200.000000000,250.000000000,300.000000000,350.000000000,
400.000000000,450.000000000,500.000000000,550.000000000,
600.000000000,650.000000000,700.000000000,750.000000000,
800.000000000,850.000000000,900.000000000,950.000000000,
1000.000000000,1050.000000000,1100.000000000,1150.000000000,
1200.000000000,1250.000000000,1300.000000000,1350.000000000,
1400.000000000,1450.000000000,1500.000000000,1550.000000000,
1600.000000000,1650.000000000,1700.000000000,1750.000000000,
1800.000000000,1850.000000000,1900.000000000,1950.000000000,
2000.000000000),
(7870.000000000,7860.000000000,7845.000000000,7830.000000000,
7815.000000000,7797.000000000,7780.000000000,7760.000000000,
7740.000000000,7725.000000000,7710.000000000,7690.000000000,
7670.000000000,7650.000000000,7630.000000000,7625.000000000,
7620.000000000,7615.000000000,7610.000000000,7580.000000000,
7550.000000000,7522.000000000,7495.000000000,7480.000000000,
7465.000000000,7450.000000000,7435.000000000,7420.000000000,
7405.000000000,7390.000000000,7375.000000000,7360.000000000,
7345.000000000,7330.000000000,7315.000000000,7300.000000000,
7285.000000000,7270.000000000,7255.000000000,7240.000000000,
7225.000000000),
(5.000000000,-0.173214286,-0.253571429,-0.312500000,
-0.296428571,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,0.000000000,-0.001607143,0.000428571,
-0.000107143,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
```

```

0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,-0.000010714,0.000013571,-0.000003571,
0.000000714,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000));
lambda_array:array[1..5,1..amount_el_array_lambda] of real = (
(50.000000000,100.000000000,200.000000000,300.000000000,
400.000000000,500.000000000,600.000000000,700.000000000,
750.000000000,800.000000000,900.000000000,1000.000000000,
1100.000000000,1200.000000000,1300.000000000,1400.000000000,
1500.000000000,1550.000000000,1573.000000000,1583.000000000,
1593.000000000,1800.000000000,1900.000000000,1950.000000000,
2000.000000000),
(482.000000000,494.000000000,532.000000000,565.000000000,
611.000000000,682.000000000,770.000000000,875.000000000,
1123.000000000,875.000000000,745.000000000,666.000000000,
666.000000000,670.000000000,670.000000000,684.000000000,
690.000000000,700.000000000,710.000000000,725.000000000,
740.000000000,752.400000000,752.400000000,752.400000000,
752.400000000),
(5.000000000,0.210365854,0.299268293,0.363658537,
0.376097561,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,0.000000000,0.001778049,-0.001134146,
0.001258537,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,0.000011854,-0.000009707,0.000007976,
-0.000004195,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000));
r_array:array[1..5,1..amount_el_array_r] of real = (
(50.000000000,100.000000000,200.000000000,300.000000000,
400.000000000,500.000000000,600.000000000,700.000000000,

```

```

750.000000000,800.000000000,900.000000000,1000.000000000,
1100.000000000,1200.000000000,1300.000000000,1400.000000000,
1500.000000000,1550.000000000,1573.000000000,1583.000000000,
1593.000000000,1800.000000000,1900.000000000,1950.000000000,
2000.000000000),
(0.870000000,0.800000000,0.690000000,0.120000000,
0.090000000,0.089700000,0.089700000,0.089700000,
0.089700000,0.089700000,0.089700000,0.089700000,
0.089700000,0.089700000,0.089700000,0.089700000,
0.089700000,0.089700000,0.089700000,0.089700000,
0.089700000,0.089700000,0.089700000,0.089700000,
0.089700000),
(5.000000000,-0.001745122,-0.000709756,-0.003951220,
-0.003885366,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,0.000000000,0.000020707,-0.000053122,
0.000053780,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,0.000000138,-0.000000246,0.000000356,
-0.000000179,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000));
alfa_array:array[1..5,1..amount_el_array_alfa] of real = (
(0.000000000,50.000000000,100.000000000,150.000000000,
200.000000000,250.000000000,300.000000000,350.000000000,
400.000000000,450.000000000,500.000000000,550.000000000,
600.000000000,650.000000000,700.000000000,750.000000000,
800.000000000,850.000000000,900.000000000,950.000000000,
1000.000000000,1050.000000000,1100.000000000,1150.000000000,
1200.000000000,1250.000000000,1300.000000000,1350.000000000,
1400.000000000,1450.000000000,1500.000000000,1550.000000000,
1600.000000000,1650.000000000,1700.000000000,1750.000000000,
1800.000000000,1850.000000000,1900.000000000,1950.000000000,
2000.000000000),
(25.000000000,25.000000000,25.000000000,25.000000000,
25.000000000,33.313706900,35.168525500,37.308545090,
39.755028190,42.529237280,45.652434880,49.145883470,
53.030845570,57.328583660,62.060360260,67.247437850,
72.911078950,79.072546040,85.753101640,92.974008230,
100.756528300,109.121924400,118.091459000,127.686394600,
137.927993700,148.837518800,160.436232400,172.745397000,
185.786275100,199.580129200,214.148221800,229.511815400,
245.692172500,262.710555600,280.588227200,299.346449800,
319.006485800,339.589597900,361.117048500,383.610100100,

```

```

407.090015200),
(5.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000),
(0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000,0.000000000,0.000000000,0.000000000,
0.000000000));
c_erase = 1;
lambda_erase = 10000;
ro_erase = 1780;
alfa_erase = 230;
var var_el:real;
function y_interpol3(amount:word;x:real;p:pointer):real;
var i,amount_el:word;
    A:real;
function m_fr(y,x:word):real;
var off_seg:word;
    el:real;
begin
    off_seg := (y-1)*amount*6+(x-1)*6;
    move(mem[seg(p^):ofs(p^)+off_seg],el,6);
    m_fr := el;
end;
begin
i := 2;
amount_el := round(m_fr(3,1));
while ((x > m_fr(1,i)) and (i <> amount_el)) do
    i := i + 1;

```

```

A := m_fr(1,i-1);
A := x-A;
y_interpol3 := m_fr(2,i-1)+m_fr(3,i)*A+
               m_fr(4,i)*A*A + m_fr(5,i)*A*A*A;
end;

function c(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
begin
  if from_erase_array(x1,x2,x3) = 1 then
    c := c_erase
  else
    begin
      var_el := y_interpol3(amount_el_array_c,heat,@c_array);
      if (temperature_fase - delta_temperature < heat) and
        (temperature_fase + delta_temperature > heat) then
        c := var_el+L_melting/delta_temperature
          {Дж/(кг*град)}
      else
        c:= var_el;
      end;
    end;
end;

function ro(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
begin
  if from_erase_array(x1,x2,x3) = 1 then
    ro := ro_erase
  else
    ro := y_interpol3(amount_el_array_ro,heat,@ro_array)*1E-9;
          {кг/м^3*1E-9=кг/мм^3}
  end;
end;

function lambda(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
begin
  if from_erase_array(x1,x2,x3) = 1 then
    lambda := lambda_erase*1E-3
  else
    lambda := y_interpol3(amount_el_array_lambda,heat,
                          @lambda_array)*1E-3;
              {Вт/(м*град)*1E-3=Вт/(мм*град)}
  end;
end;

function r(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
begin
  if from_erase_array(x1,x2,x3) = 1 then
    r := y_interpol3(amount_el_array_r,temperature_erase,@r_array)
  else
    r := y_interpol3(amount_el_array_r,heat,@r_array);
  end;
end;

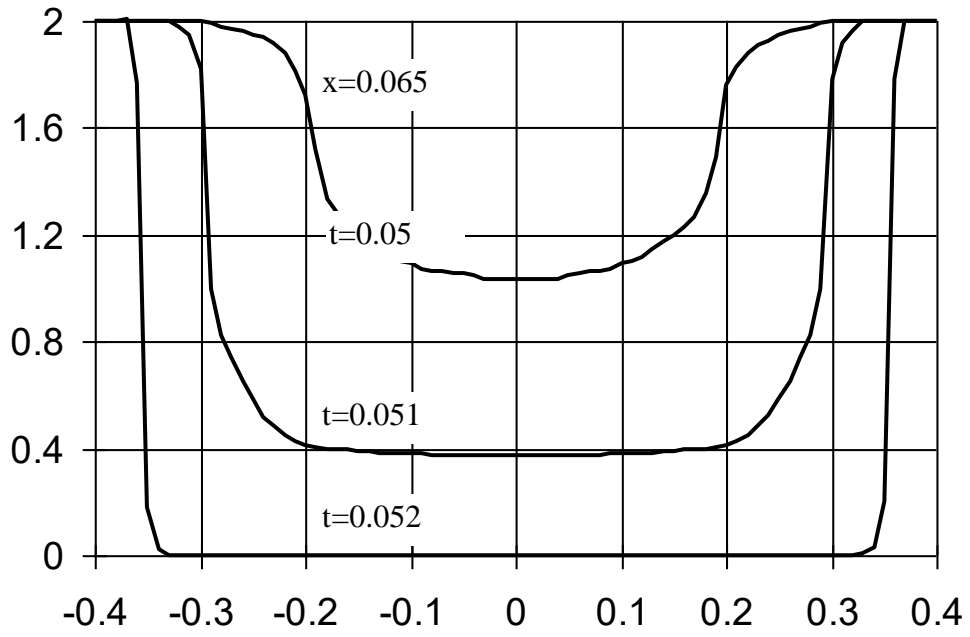
function alfa(x1,x2,x3:word;heat:real):real;
begin
  if from_erase_array(x1,x2,x3) = 1 then
    alfa := alfa_erase*1E-6
  else
    alfa := y_interpol3(amount_el_array_alfa,heat,
                        @alfa_array)*1E-6;
              {Вт/(м^2*град)*1E-6=Вт/(мм^2*град)}
  end;
end;
end.

```

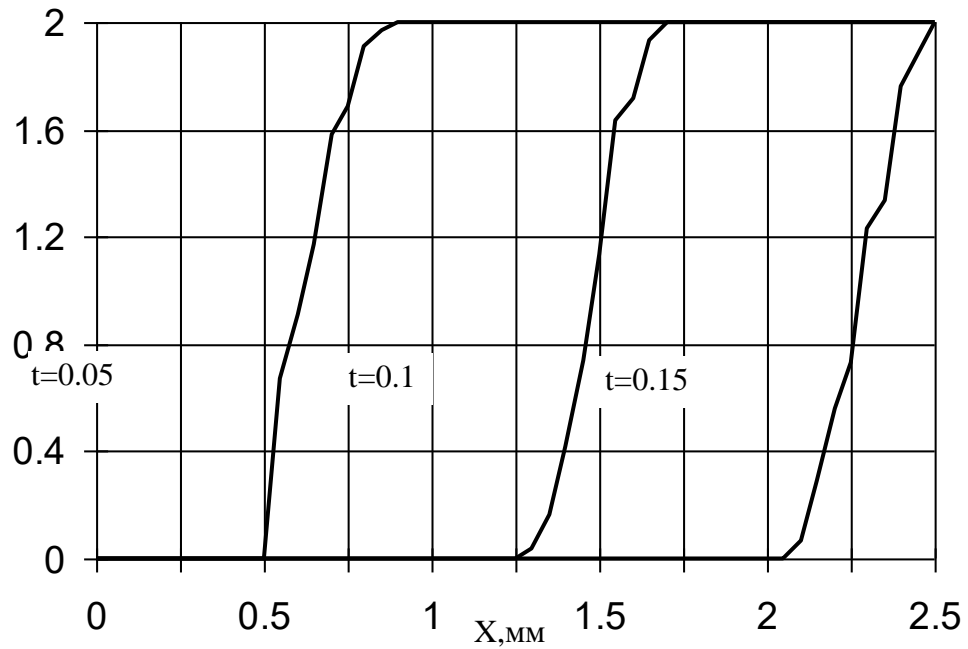
Додаток Б

Результати розрахунку теплової задачі

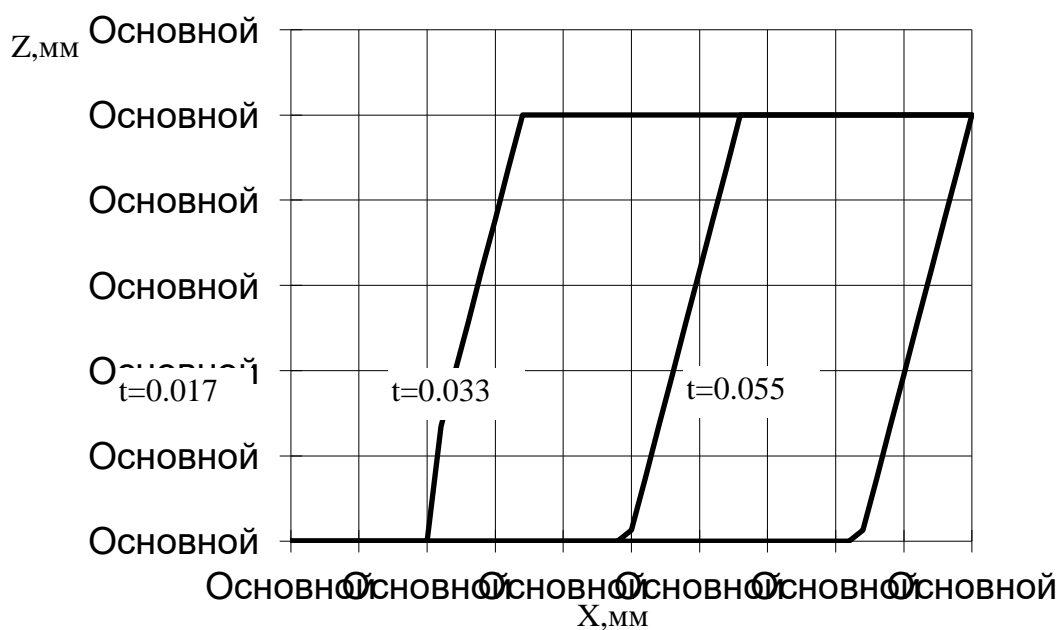
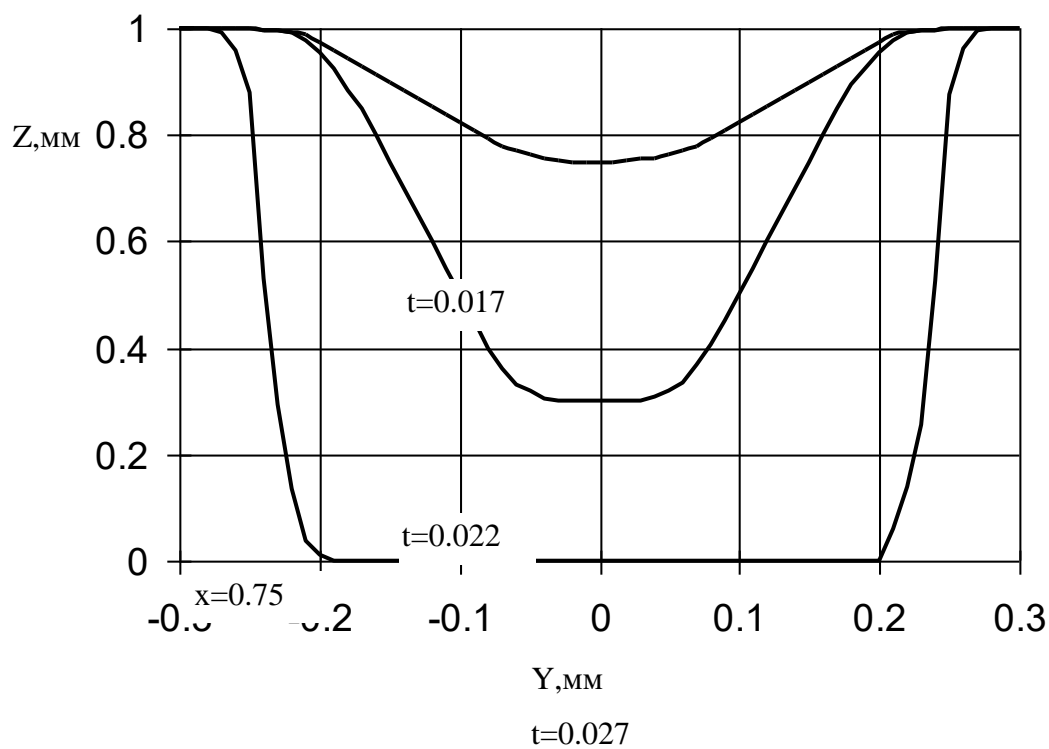
Z,MM



Z,MM



$$V = 1\text{M/c}, P = 1500\text{BT}, d = 0.5\text{MM}$$



$V = 3 \text{ м/с}, P = 2200 \text{ Вт}, d = 0.5 \text{ мм}.$

Додаток В

Листінг програми розрахунку газодинамічної задачі.

```
program soplo_str;
uses  matrix,gr_unit,matem;
const  d:array[1..3] of real = (0.5e-3,0.7e-3,0.9e-3);
      {діаметр виходного отворстия, м}
      kol_pix = 19;
      k = 1.38;
      r = 287.25;{газовая постоянная}
      t1 = 298;{температура входного газа, К}
      t_n = 300;{температура окружающей среды, К}
      p1 = 6E+5;{давление входного газа, в Паскалях}
var  t2,w1,M1,M2,m_copy,step,p2,A,t,a_kr,u1,u2:real;
      ro2min,ro2max,t2min,t2max,p2min,p2max,M1min,M1max,
      M2min,M2max,Amin,Amx,f_k_l,u2min,u2max,a_1,x_n:real;
      num:word;
      f1,f2,f3,f4,f5:text;
      i:byte;
function func(k,l:real):real;
begin
  func := 1+(k-1)/2*l;
end;
procedure raschet;
begin
  M1 := m_copy;
  M2 := M1;
  M2min := M2;
  M2max := 1;
  step := (M2max-M2min)/(kol_pix-1);
  num := 1;
  while num <= kol_pix do
    begin
      write(f1,m2:3:2);
      write(f2,m2:3:2);
      write(f3,m2:3:2);
      write(f4,m2:3:2);
      write(f5,m2:3:2);
      for i := 1 to 3 do
        begin
          t2 := f_k_l/func(k,M2);
          A := (d[i]*1e+3*d[i]*1e+3*pi/4)/(m1/m2*degree(1/t2,(k+1)/2/(k-1)));
          a := sqrt(4*a/pi);
          p2 := p1*degree(t2,k/(k-1));
          u2 := u1*m2/m1*sqrt(t2);
          t2 := t1*t2;
          x_n := degree(1/(0.134*t2/t_n),0.5)/(0.5*0.27*(1+t2/t_n))*d[i]*1e+3;
          write(f1,',',a:3:4);
          write(f2,',',x_n:3:4);
          write(f3,',',p2*1E-5:3:4);
          write(f4,',',t2:3:4);
          write(f5,',',u2:3:4);
        end;
      writeln(f1,"");
      writeln(f2,"");
```

```

        writeln(f3,"");
        writeln(f4,"");
        writeln(f5,"");
        num := num + 1;
        M2 := M2 + step
    end;
end;
begin
    assign(f1,'m2_a2.txt');
    assign(f2,'m2_x_n.txt');
    assign(f3,'m2_p2.txt');
    assign(f4,'m2_t2.txt');
    assign(f5,'m2_u2.txt');
    rewrite(f1);
    rewrite(f2);
    rewrite(f3);
    rewrite(f4);
    rewrite(f5);

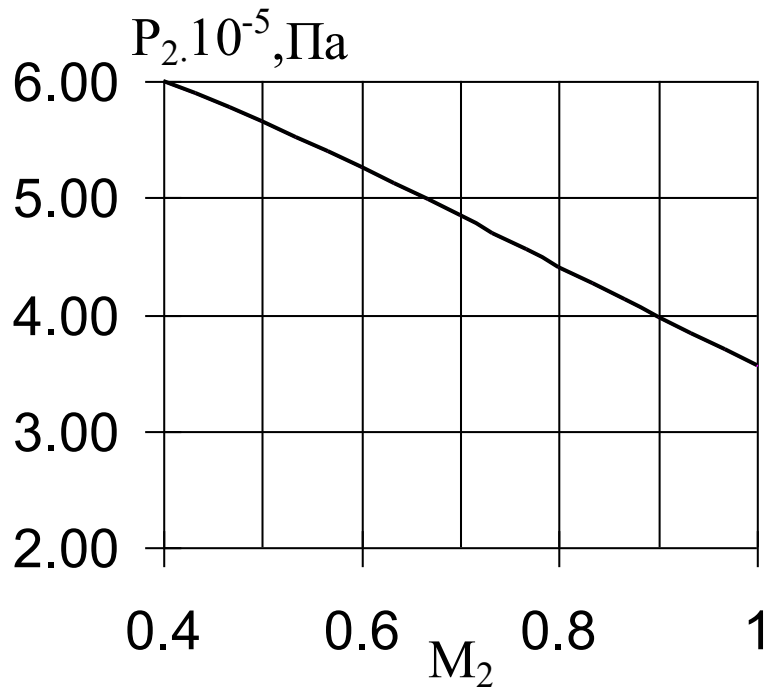
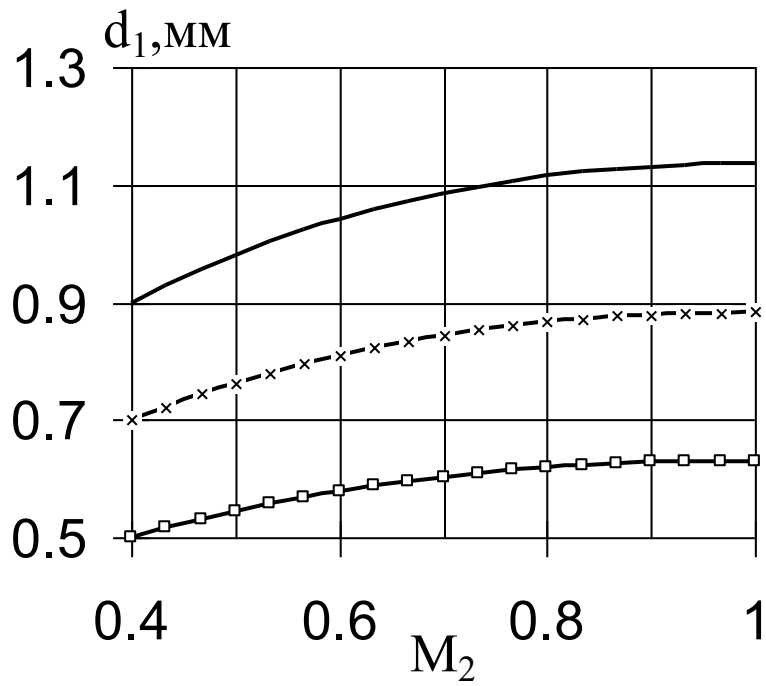
    a_1 := sqrt(k*r*t1);
    w1 := 0.4*sqrt(k*r*t1);
    M1 := w1/a_1;
    u1 := W1;
    m_copy := M1;
    f_k_1 := func(k,M1);
    raschet;

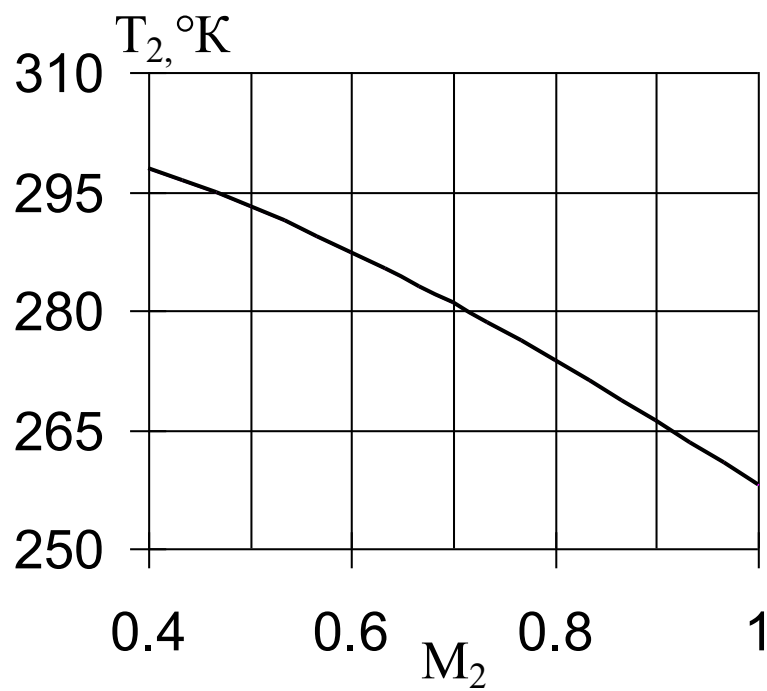
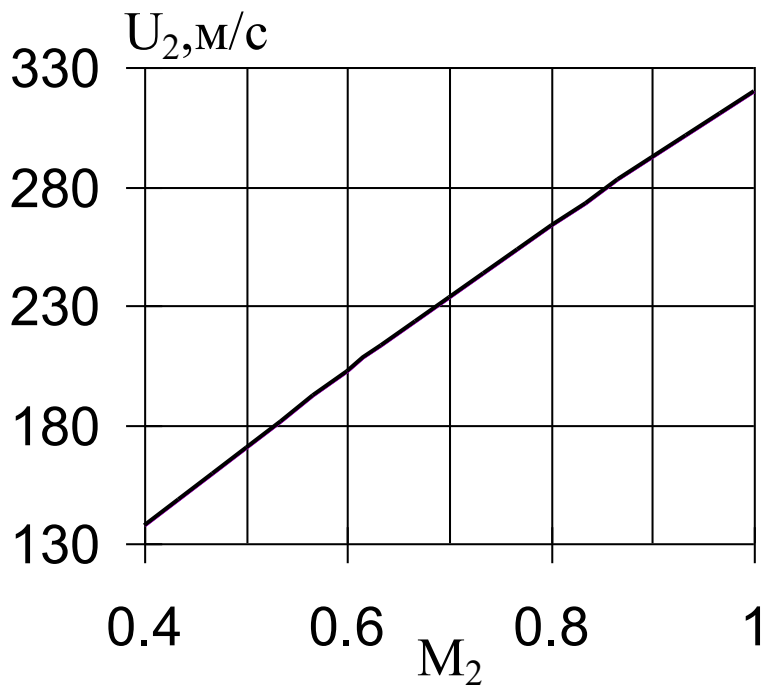
    close(f1);
    close(f2);
    close(f3);
    close(f4);
    close(f5);

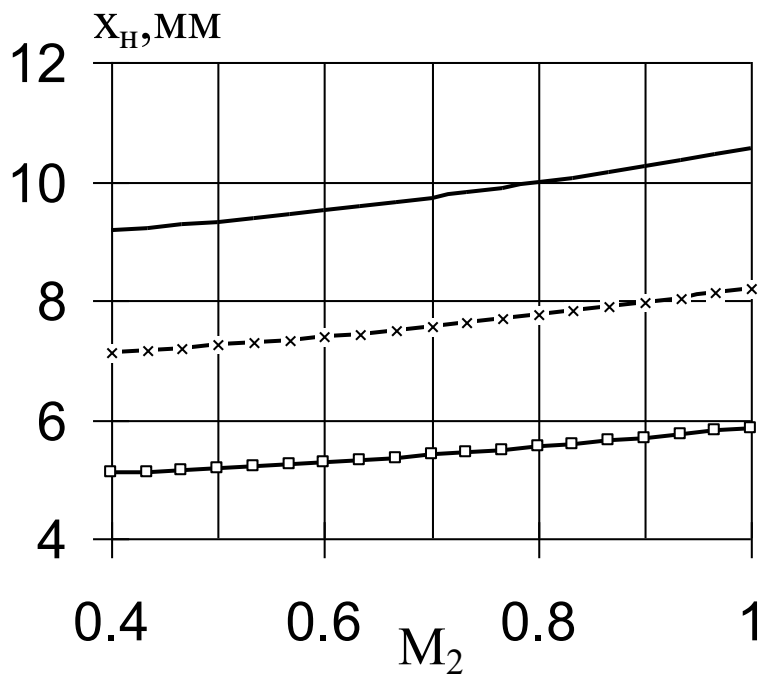
end.

```

Додаток Г
Результати розрахунку газодинамічної задачі







—□— $d_2=0,5$ MM

—x— $d_2=0,7$ MM

— $d_2=0,9$ MM

$P_1=600000$ Па, $T_1=298^\circ$ K, $u_1=138$ М/с, $M_1=0,4$