

Київський політехнічний інститут

На правах рукопису
УДК 621.373.826

КОТЛЯРОВ

Валерій Павлович

Технологічні основи проектування операцій лазерної обробки

Спеціальності: 05.03.07 - Процеси лазерної
та фізико-технічної обробки
та
05.02.08 - технологія машинобудування

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступня
доктора технічних наук

Київ 1995



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Київському політехнічному інституті на кафедрі лазерної технології та конструювання машин.

Науковий консультант - Заслужений діяч науки та техніки України, академік АН України, доктор технічних наук, професор Коваленко В.С.

Офіційні опоненти:

1. Доктор технічних наук, професор САФОНОВ А.М.
2. Доктор технічних наук, професор БІЛОУС М.В.
3. Доктор технічних наук, професор АФТАНАЗІВ І.С.

Провідна організація - Київське державне підприємство "Смарагд"

Захист відбудеться 19.06 1995 р.

о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої Ради

з присудження наукового ступеня доктора технічних наук у Київському політехнічному інституті.

Корпус 1, аудиторія 214.

Адреса: 252056, м.Київ, пр.Перемоги,37

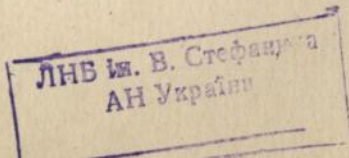
З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Київського політехнічного інституту

Автореферат розіслано 10.05 1995 р.

Вчений секретар спеціалізованої Ради,

доктор технічних наук, професор

Равська Н.С.



Метою роботи

є підвищення якості та ефективності виготовлення деталей машин лазерним променем за рахунок створення оптимальних технологічних процесів та оснащення внаслідок застосування розроблених технологічних основ проектування операцій лазерної обробки.

Для реалізації мети вирішено ряд питань, з яких на захист виносяться:

1. Результати експериментальних досліджень процесів лазерної обробки для основних технологічних операцій у вигляді рангових діаграм параметрів процесу для їх кількісних, якісних, показників продуктивності.
2. Методика та засоби параметричного управління процесом лазерної обробки шляхом цілеспрямованого впливу на характеристики пучка випромінювання, технологічні заходи.
3. Розрахунково-аналітичний метод прогносної оцінки точності операцій лазерної обробки.
4. Дані аналізу структури сумарної похибки розмірних показників основних технологічних операцій.
5. Результати та методика експериментального моделювання операцій розмірної обробки і контурної різки з формалізацією основних етапів проектування, а також постановка та розв'язання задач оптимізації процесу.
6. Методика досліджень процесу зміцнюючої обробки обчислювальними експериментами, результати вивчення теплової історії зони нагріву, постановка задачі оптимізації та результати її розв'язання.
7. Результати, методика та стенд для вивчення дійсної поглинаючої здатності поверхні заготовки.
8. Розроблені, досліджені та систематизовані методи та засоби додаткового удосконалення операцій лазерної обробки.
9. Розроблена САПРТО, її інформаційне та програмне забезпечення.
10. Результати практичного упровадження досліджень у виробничих умовах

Наукові положення, розроблені дисертантом, та новизна теми:

- вперше обробку матеріалів пучком лазерного випромінювання розглянуто у зв'язку з функціонуванням технологічної системи обробки, що при дослідженні взаємозв'язків між параметрами та результатами процесу, розробці методів проектування операцій та оцінки відтворюваності їх показників дало можливість спиратися на наукові основи технології машинобудування;
- вперше виконано параметричний аналіз процесу лазерної обробки у умовах ТОС, його результати у вигляді рангових діаграм впливу

технологічних факторів на показники /кількісні, якісні та продуктивності/ технологічних операцій застосовуються при моделюванні, оптимізації та удосконаленні процесу;

- розроблено статистичні показники результатів лазерної обробки, які підвищують інформованість о процесі та застосовуються як складові частини функцій мети при розв'язанні задач оптимізації;
- вперше розроблено комплекс заходів та засобів параметричного впливу на характеристики об'єктів ТОС з метою управління рівнем показників технологічної операції;
- розроблено аналітичний метод прогнозування показників відтворюваності розмірних характеристик операцій, який ґрунтується на вивченні фізичних процесів при формуванні лазерного променя та його діянні на заготовку;
- вперше виконано аналіз структури сумарної похибки, результати якого використовуються при розробці методів та засобів удосконалення технологічної операції, при формуванні функцій мети для оптимізації процесу;
- формалізовано процедуру експериментального моделювання процесів розмірної обробки та контурної різки, розроблено математичні моделі виготовлення отворів та нарізки шкал вимірювального інструмента;
- розроблено методологію та математичне забезпечення досліджень процесу зміцнюючої обробки обчислювальними експериментами, вивчено закономірності теплової історії зони лазерного нагріву у напівобмеженій платівці та у платівці з обмеженими умовами тепловідводу за умови урахування температурної залежності теплофізичних властивостей матеріалу заготовки та поглинаючої здатності її поверхні;
- сформульована та розв'язана оптимізаційна задача формування зони зміцнення заданих властивостей, розміра та форми у тилі заготовки з обмеженими умовами тепловідводу при управлінні процесом за рахунок доцільного розміщення на її поверхні теплового джерела з оптимальним розподілом інтенсивності;
- вперше розроблено та забезпечено необхідними компонентами /банк даних, цільовими та базовими підпрограмами/ систему автоматизованого проектування технологічної операції, яка діє у автоматичному та діалоговому режимах, з можливістю саморозвитку;
- розроблено на рівні винаходів та досліджено засоби та пристрої для удосконалення технологічних операцій, які систематизовані за призначенням, об'єкту діяннн в ТОС та рівнем розробленості і створюють базу даних технологічного оснащення ТОС.

Практичне значення:

- при створенні автоматизованої системи проектування та виробництва (САПР ПВ)

- при розробці та упровадженні технологічних процесів розмірної обробки, контурної різки та лазерної термічної обробки у промисловості;
 - при розробці, модернізації та дослідженні лазерного технологічного обладнання, контрольно-вимірювальної апаратури, технологічного оснащення;
 - при створенні автоматизованих робочих місць технолога/АРМТ/;
 - у подальших наукових дослідженнях процесів лазерної обробки аспірантами, науковими співробітниками різноманітних установ;
- у навчальному процесі для студентів механічних спеціальностей у курсах "Технологія лазерної обробки", "Спеціальні елементи та пристрої лазерних технологічних комплексів", "Основи наукових досліджень та технічна творчість" та ін., при виконанні курсових та дипломних робіт.

Реалізація роботи.

На базі одержаних у дисертації результатів розроблено і упроваджено у виробництво технологічні процеси лазерної обробки, технологічне оснащення та відповідне обладнання шляхом створення дільниць та лабораторій лазерної обробки. Так, на базі НДІ радіовимірювальних приладів /м.Вільнюс/ створено галузеву лабораторію лазерної технології, яку обладнано 6 лазерними технологічними комплексами, два з яких модернізовано /заміна випромінювачів, оптичної системи, застосування спеціального технологічного оснащення та засобів обробки/. Упроваджено технологічні операції контурної різки виробів з слюди, бронзи, ЗІГ-структур, обробки керамічних заготовок /різка розмірних вікон, обробка отворів/, зварювання хвилевідів з міді та латуні, зміцнення дрібно розмірного різального інструмента. Лабораторія обслуговує лазерною технологією галузь по виробництву засобів зв'язку. В умовах ВО "Завод Арсенал" створено дільницю лазерної обробки керамічних заготовок плат друкованого монтажу та виробів з надтвердих матеріалів /сапфір, скло/. На підприємстві "Індуктор" /м.Івано-Франківськ/ упроваджено обладнання та технологію лазерної обробки у штеповому виробництві /зміцнення робочих кромek інструментів, виготовлення отворів у заготовках з твердого сплаву/ та маркування пластмасових виробів. Для упровадження розробленої технології обробки природних алмазів створено дільницю лазерної обробки на підприємстві "Смарагд", досвід її роботи поширено на галузь виробництва коштовностей з діамантами. Для потреб меблевих фабрик м.Київа використовуються можливості виготовлення виробів з дерева на лазерному обладнанні /потужний лазер ТЛ-1,5 та стол з ЧПУ:1,5х2,0 м/, упровадженому на меблевій фабриці /с.Биковня/. Усього створено 8 дільниць на підприємствах України та СНД. Результатами упровадження лазерної обробки є

підвищення якості виробів, у тому числі їх експлуатаційних показників, зниження збитків на брак, зменшення витрат дефіцитного інструмента, та підвищення продуктивності операцій. Багато з операцій не може бути виконано з достатньою якістю без лазерної технології. Усе це дозволило одержати економічний ефект понад одного млн.крб. /без урахування ефекту від широкого упровадження лазерної технології у діамантове виробництво, у цінах до 1991 р./.

Результати роботи використовуються у навчальному процесі Київського політехнічного інституту.

Апробація роботи. Про основні положення роботи доповідалось на науково-технічних конференціях, семінарах, найважливіші з яких: міжнародні конференції: "Електротехнологія", Магдебург, НДР, 1985 р.; "Застосування лазерів у технології", м.Таллінн, 1987 р.; "Лазерна технологія", м.Вільнюс, 1989 р.; Всесоюзні науково-технічні конференції та республіканські семінари: "Застосування ОКГ у сучасній науці та техніці", м.Ленінград, 1973 р.; "Застосування лазерів у машинобудуванні та інших галузях техніки і фізичні основи розробки газових лазерів", м.Москва, 1974 р.; "Передова технологія", м.Рязань, 1977 р.; "Ельфа-77", м.Ленінград, 1977 р.; "Використання лазерів у приладобудівництві, машинобудівництві та медичній техніці", м.Москва, 1979 р.; "Прогресивні технологічні процеси", м.Жєвськ, 1983 р.; "Застосування методів лазерної інтерферометрії для підвищення якості виробів", м.Мінас, 1984, 1986, 1987, 1988 рр.; "Застосування лазерів у техніці та науці", м.Омськ, 1984, 1985, 1988, 1989 рр.; "Прогресивні методи обробки та автоматизація у машинобудуванні", м.Душанбе, 1984, 1985 рр.; "Електрофізикохімічні та комбіновані методи обробки", м.Пенза, 1984, 1988 рр.; "Застосування лазерів у народному господарстві", м.Звенигород, 1985 р.; "Створення та використання лазерної техніки та технології", м.Київ, 1985, 1991 рр.; "Застосування лазерної техніки для підвищення якості виробів", м.Тюмень, 1985 р.; "Сучасні проблеми технології машинобудування", м.Москва, 1986 р.; "Прогресивні технології у ГВС", м.Ленінград, 1987 р.; "Лазерна технологія", м.Вільнюс, 1987, 1988 рр.; "Розробка та промислова реалізація нових механічних та фізико-хімічних методів обробки", м.Москва, 1988 р.; "Нові розробки та досвід упровадження лазерної технології", м.Ужгород, 1990 р. та ін.

Публікації. По темі дисертаційної роботи опубліковано 188 наукових праць, у тому числі 5 монографій, одна з яких перевидана у Болгарії, 75 винаходів

Структура і обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, 6 розділів, загальних висновків та додатку, викладених на 323 сторінках машинописного тексту, вміщує 173 рисунки, 54 таблиці.

Зміст роботи

На початку роботи обґрунтовується актуальність розглянутих у дисертації питань, сформульовано завдання досліджень та наукову новизну роботи. В аналітичній частині першого розділу розглянуто сучасний стан лазерної обробки з погляду її реалізації у ТСО. Прочитано технологічні параметри процесу обробки, які застосовують для впливу на хід технологічної операції. Відзначається, що вибір комплексу факторів, які керуються, дещо випадковий, методика їх змінювання не гарантує цілеспрямованого впливу на рівень того чи іншого показника технологічної операції. Для оцінки результатів обробки використовуються стандартні показники, які не відображають дійсного випадкового характеру процесу, недостатньо інформативні та ефективні для вивчення його закономірностей експериментальними методами. При визначенні справжніх можливостей одного з найважливіших етапів розробки технологічного процесу - розрахунку режимів обробки - встановлено, що, по-перше, усі існуючі методики характеризуються загальним недоліком: їх форма зручна для опису результатів обробки, але з умов залежності останніх від декількох факторів, робить неможливим вибір оптимального режиму обробки. Далі, при використанні аналітичних моделей, похибки прогнозного проектування зростають у міру ускладнення процесів при взаємодії лазерного променя з речовиною. Показано, що розбіжності результатів розрахунків по різних моделях процесу для розмірної обробки /рис.1/ та для контурної різки /рис.2/, достатньо великі і зростають з підвищенням густини потужності випромінювання /ГПВ/ як для діаметральних розмірів отворів d , так і для їх глибини h , для ширини різу b при імпульсній /а/ та безперервній обробці /б/. Аналітичні моделі зміцнюючої обробки дають результати більш близькі до фактичних за умов коректної постановки та розв'язання задач тепліспереносу, але спрощення математичних залежностей до інженерного /практичного/ рівня суттєво знижує якість розрахунків. Якщо розмірні показники в тій чи іншій мірі досліджено експериментально або теоретично, то показники продуктивності та якісні характеристики процесу, крім показників шорсткості обробленої поверхні, майже не досліджено, не встановлено кількісних зв'язків між їх рівнем та значенням факторів, що керуються. Розгляд тенденцій розвитку технології лазерної обробки виявив її слідування загальноновизнаним канонам розвитку технології машинобудування: автоматизація та адаптивна організація операцій, створення гнучких виробничих систем /ГВС/ на базі роботизації та "безлюдних" технологій. Аналіз сучасного стану розробок технологічного оснащення показав, що, не зважаючи на великий їх обсяг, використання існуючих

рішень ускладнюється браком оцінок їх дійсних можливостей та ефективності, а також відсутністю систематизації згідно призначенню, об'єкту діяння у ТОС та ін. Результати практичного застосування лазерної обробки свідчать про можливість поширення упровадження лазерного променя як інструмента за умови підвищення якості результатів, зниження енергонасиченості операцій, упровадження спрощених /формалізованих/ методів проектування операцій, насиченості процесу ефективним оснащенням. У першому розділі розглянуто також деякі питання параметричного управління процесом обробки за рахунок використання розроблених автором засобів внутрі- або позарезонаторного впливу на пучок лазерного випромінювання, які доповнюють можливості управління його параметрами засобами. передбаченими у серійного ЛТО.

Таким чином, на підставі проведеного аналізу можна сформулювати такі завдання досліджень:

- виконати аналіз факторів, що впливають на процес обробки матеріалів пучком лазерного випромінювання, прорангувати за ступенем впливу на його якісні та розмірні результати, показники продуктивності з метою утворення передумов ефективного управління процесом;
- дослідити керуємість технологічних факторів, розробити методи та засоби параметричного діяння на рівень вихідних результатів;
- вивчити показники якісних та розмірних результатів базових технологічних операцій:
 - лазерна розмірна обробка отворів та паазів;
 - контурна різка листових заготовок;
 - зміцнююча обробка при нагріві пучком лазерного випромінюваннята розробити їх статистичні аналоги для ефективного і однозначного опису процесу;
- дослідити питання точності обробки для базових технологічних операцій, розробити аналітичний метод прогнозного розрахунку похибок їх розмірних показників та кількісного рангування елементарних складових, визначити головні напрямки зниження чутливості процесу до його збурення початковими нестабільностями;
- розробити та створити передумови для розробки операцій розмірної обробки та контурної різки на формальній основі, використовуючі рангування факторів, результати експериментальних досліджень з урахуванням мети моделювання і ступеня вивченості процесу;
- оцінити можливості та вивчити результати досліджень теплового стану заготовок при лазерному нагріві методом обчислювальних

експериментів на базі чисельного рішення нелінійного рівняння теплопровідності з урахуванням нелінійностей I та II роду, а також обмежень на тепловідвід; сформулювати задачу проектування операцій зміцнюючої лазерної обробки з урахуванням факторів, які визначають положення та форму зміцненого шару;

- сформулювати та вибрати методику розв'язання оптимізаційних задач проектування операцій лазерної обробки як багатокритеріальних систем шляхом формування узагальненої функції мети, яка зважає на розмірні, якісні, показники продуктивності та факторні обмеження на процес обробки;
- розробити алгоритм та інформаційне забезпечення системи автоматизованого проектування базових технологічних операцій, яка включає до себе підсистами аналізу, моделювання та оптимізації процесу, вибору обладнання, аналізу точності результатів обробки, а також підбору методів та засобів додаткового удосконалення операції;
- розробити та дослідити методи та засоби додаткового удосконалення операцій лазерної обробки, систематизувати їх за призначенням, об'єктам діянню /інструмент/, технологічні заходи, : /готовка/ та ступенем розробленості; упровадити результати досліджень, розроблені заходи та оснащення у промисловість.

Експериментальні дослідження проводились на спеціально обладнаному стенді з широкими можливостями впливу на параметри лазерного променя, їх аналізу та вимірювання, переобладнання на інший режим випромінювання, зокрема довжину хвилі. У дослідженнях також використовувались лазерні технологічні комплекси /серійні та модернізовані/ ГПЛТ 250-400/500; ГПЛТ 16-400/500; лазерне технологічне обладнання, оснащене столами із ЧПУ на базі лазерів ТЛ-1,5; ЛТИ-502; ЛГИ-505; ЛГ-50-2 та інші. Для вимірювання та контролю параметрів променя застосовувались стандартні та оригінальні пристрої; розмірних характеристик результатів обробки - мікроскопи, зв'язані з ПК; якісних - профілограф-профільметр 201, мікротвердомір ПМТ-3 та ін.

У роботі дослідження виконувались по активній схемі з багатфакторним управлінням процесом по традиційному алгоритму.

У обсяг питань, розглянутих у дисертації, увійшли ті, які відповідно до мети досліджень, складають технологічні основи лазерної обробки. На рис.3 показано структуру досліджень та їх взаємозв'язок з ТОС. Перелік факторів x_i , які тим чи іншим чином впливають на рівень комплексного показника лазерної обробки ГПВ, від якого залежить характер діяння лазерного променя на заготовку, включає до себе

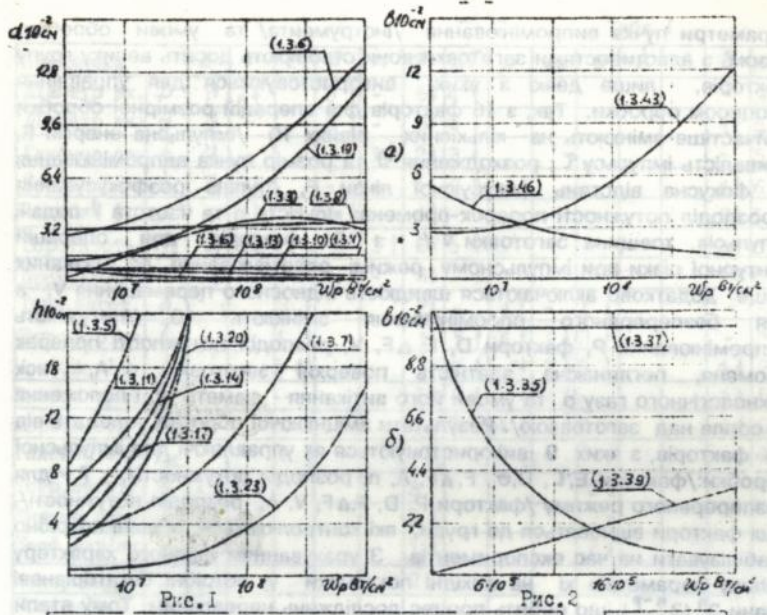


Рис. 1

Рис. 2

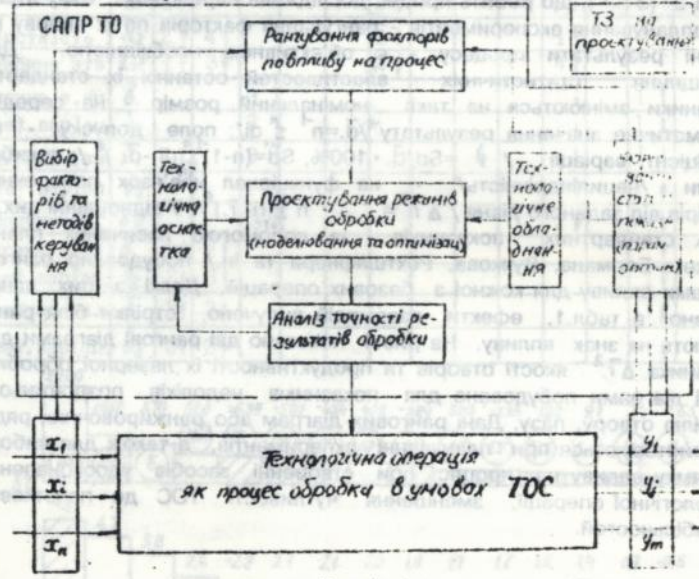


Рис. 3

параметри пучка випромінювання /інструмента/ та умови обробки. Разом з властивостями заготовки вони створюють досить велику групу факторів, лише деякі з яких використовуються для управління процесом обробки. Так, з 16 факторів для операцій розмірної обробки найчастіше змінюють на кількісних рівнях 10 /імпульсна енергія E , тривалість імпульсу τ ; розходження θ та розмір пучка випромінювання D ; фокусна відстань фокусувальної лінзи F , ступінь розфокусування ΔF , розподіл потужності поперек променя; кількість n та частота ν подачі імпульсів, товщина заготовки δ /; з 19 факторів для операцій контурної різки при імпульсному режимі опромінювання до названих вище додатково включаються швидкість відносного переміщення V , а для безперервного опромінювання змінюють 10 /потужність випромінювання P , фактори D , F , ΔF , V , розподіл потужності поперек променя, поглинаюча здатність поверхні заготовки A , тиск технологічного газу p та умови його витікання - діаметр d_c і положення зс сопла над заготовкою/. Результати зміцнюючої обробки залежать від 15 факторів, з яких 9 використовуються як управляючі для імпульсної обробки; фактори $E, \tau, D, \theta, F, \Delta F, A, n$, розподіл потужності /; 7 - для безперервного режиму /фактори $P, D, F, \Delta F, V, A$, розподіл потужності/. Інші фактори відносяться до групи, які контролюються, їх рівні потрібно стабілізувати на час експериментів. З урахуванням дійсного характеру впливу параметрів x_i на вихідні показники y_j потрібні багаторівневі плани 3^n (3^{n-p}), що робить процес досліджень нереальним. Тому етапи передпланування експериментів - рангування факторів по їх впливу на вихідні результати процесу - є об'єктивною необхідністю. Для підвищення статистичних властивостей останніх їх стандартні показники змінюються на такі: номінальний розмір - на середнє арифметичне значення результату $\bar{d} = n^{-1} \sum_{i=1}^n d_i$; поле допуску - на коефіцієнт варіації $V = Sd/\bar{d} \cdot 100\%$, $Sd = (n-1)^{-1} \sum_{i=1}^n (d_i - \bar{d})^2$; похибка форми /нециліндричність/ - на функціонал зв'язок поперечних розмірів від заданого рівня $\Delta \bar{r}^2 = n^{-1} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2$. У відношенні цих, а також стандартних показників за допомогою насичених планів /Плакета-Бермана, Вучкова, Рехтшафнера та ін./ побудовано рангові діаграми впливу для кожної з базових операцій. Деякі з цих даних зведено в табл.1, ефекти взаємодій вилучено, стрілки біля рангу указують на знак впливу. На рис.4 показано дві рангові діаграми для показника $\Delta \bar{r}^2$ якості отворів та продуктивності їх лазерної обробки. Схожі діаграми побудовано для показників недоліків поздовжнього профілю отвору, пазу. Дані рангових діаграм або ранжировочних рядів використовуються при плануванні експериментів, а також для вибору напрямку впливу на процес при створенні засобів удосконалення технологічної операції, зменшення чутливості ТОС до початкових нестабільностей.

Показники	E	τ	ρ	θ	n	γ	$\Delta\gamma$	ρ	z_c	U	V	d_s	δ	МАТ
Диаметр вх.	\bar{D}	1	2	5	-	6	4						-	3
Диаметр вых.	\bar{d}	1	-	6	-	3	2						4	5
Глубина отг.	\bar{h}	4	-	-	1	2	3						-	5
Коеф. варіац.	ν_d	1	3	-	-	5	2						4	6
Похибка ф.	Δz^2	-	2	5	-	4	-						3	1
Шорсткість	R_z	1	2	-	3	6	5						4	5
Продуктивн.	t	1	7	5	-	3	4						2	6
Товщ. загот.	δ			3		2	-	4	-	1			-	5
Ширина різа	\bar{b}			4		1	5	6	2	3			-	3
Коеф. варіац.	ν_b			5-6		7	1	5-6	2	3			4	3
Висота грат	\bar{h}_c			-		1	3	5	2	-			4	5
Шорсткість	R_z			5		3	6	4	7	2			1	3
Глибина ств.	\bar{z}_p			3		-	-	2	-	1			-	4
Товщ. загот.	δ	1	4			3				2				
Ширина різа	\bar{b}	2	4			1				3				
Коеф. варіац.	ν_b	3	4			1				2				
Неперпенд.	\perp	1	-			2				3				4
Конусність	\bar{K}	1	-			2				3				4
Шорсткість	R_z	2	4			3				1				-
Глибина ств.	\bar{z}_p	1	3			2				4				5
Ширина з.зм.	\bar{b}			3						2			1	
Коеф. варіац.	ν_b			3						2			1	
Глибина з.зм.	\bar{z}			3						2			1	
Коеф. варіац.	ν_z			1						2			3	
Продуктивн.	δU			3						2			1	
Ширина зм.з.	\bar{b}	3	2										-	
Коеф. варіац.	ν_b	2	3										1	
Глибина зм.з.	\bar{z}	2	3										1	
Коеф. варіац.	ν_z	2	3										1	

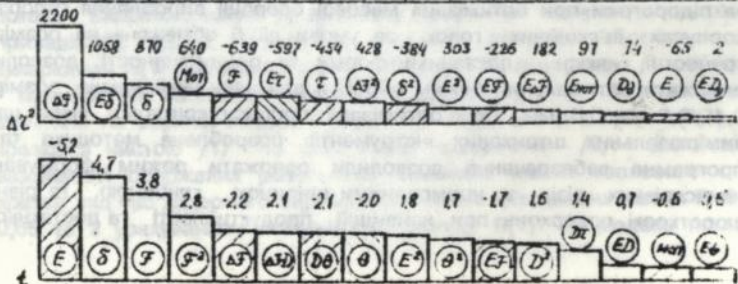


Рис. 4.

При розробці методів проектування режимів обробки є доцільним розглядати операції розмірної обробки та контурної різки разом тому, що для обох видів аналітичні моделі дають результати з великими похибками /рис.1,2/. Математичні моделі, які розробляються експериментальними методами, є єдиним шляхом для режимного забезпечення цих операцій. Для спрощення процедури експериментального моделювання в роботі, крім рангування факторів, розроблено каталог планів, які відповідають критеріям D - оптимальності для зменшення похибок при розрахунку коефіцієнтів моделей із-за значної нестабільності процесу; більшість з яких ортогональна. Вибір плану здійснюється за формальними ознаками і наявності визначеної моделі, кількості параметрів оптимізації, вибраних вхідних факторів. Для найбільш досліджених процесів, гіпотетична модель яких включає до себе визначений перелік членів /уточнення залежностей, розширення факторного простору, підміна функцій мети/ рекомендованими є компромісні плани з необхідною потужністю. При пошуках режимів обробки розглядаються два випадки: перший, коли операція оптимізується за одним критерієм /така задача зустрічається рідко гом., що до одного технологічного показника майже завжди додається техніко-економічний/, друга задача- багатокритеріальна. У першому випадку розв'язання однокритеріальної задачі оптимізації знаходиться пошуком стаціонарних точок поверхні відгука методом формування системи квазіоднофакторних моделей процесу або канонічним перетворенням рівняння регресії. При рішенні багатокритеріальних задач пошук стаціонарних точок, оптимальних для кількох критеріїв водночас майже неможливий, навіть при використанні ЕОМ. З метою спрощення процедури оптимізації розроблено методичку, по-перше, перетворення параметрів відгуків у функцію, яка мінімізується, /частинна функція бажаності, функціонали нев'язок/, по-друге, їх об'єднання у єдину функцію мети /узагальнена функція бажаності, з використанням невизначених множників Лагранжа та штрафних функцій/. Усі перетворення виконуються за розробленими підпрограмами. Для пошука координат екстремальних точок також розроблено підпрограми за алгоритмами Ньютона, Девідсона-Флетчера-Пауела та Хука-Дживса. Використання розроблених методик та підпрограм при оптимізації масової операції вироблення отворів у корпусах ін'єкційних голок за умови дії 5 обмежень на розмірні, точнісні, якісні, показники форми та продуктивності, дозволило одержати оптимальний режим обробки для ряду номінальних розмірів: 0,4; 0,6 та 0,8 мм. При оптимізації процесу контурної різки шкал вимірювальних штрихових інструментів розроблена методика та її програмне забезпечення дозволило одержати режим формування ненаскрізнних різів з нормованими шириною, глибиною, та рівнем шорсткості поверхонь при найвищій продуктивності та достатньому

рівні відтворюваності розмірів. Оптимізовано режими нарізки шкал з шириною штриха від 3 мкм до 120 мкм /через 2, 5, 10/. Упровадження оптимізованих операцій у промисловість дало значний економічний ефект.

Для проектування операцій зміцнюючої обробки зі скороченням переліком процесів при взаємодії променя з матеріалом заготовки /незначним масопереносом, оплавленням поверхні/ доцільним є використання аналітичних методів моделювання. Як показав аналіз існуючих розробок висока точність результатів може бути досягнута при чисельних методах розв'язань рівняння теплопровідності з коректними межовими умовами, які беруть до уваги температурну залежність теплофізичних характеристик матеріала заготовки, температурну, а також залежність від дійсного стану поверхні її поглинаючої здібності, втрати тепла на фазові перетворення, обмеження на тепловідеження на межових поверхнях заготовки:

$$C_V(T) \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z}] \quad (1)$$

$$T_0 = T_{start} = t^{\circ}C$$

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=0} = [1-R(T)] W_p(x, z, t); C_V' = C_V(T) + \delta Q_{пл}(T - T_{пл}); \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} |_{x=H_x} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} |_{y=H_y} = 0; \frac{\partial T}{\partial y} |_{x=f(y, r)} = 0; \frac{\partial T}{\partial z} |_{z=H_z} = 0$$

Якщо функції $C_V(T)$ та $\lambda(T)$ можна одержати інтерполяцією табличних або графічних даних, то такі дані для $R(T)$ відзначаються суперечливістю і не враховують дійсного стану поверхні заготовки /її шорсткість, наявність окисних та штучних плівок, тощо/. Так, рівень R коливається від 0,15 до 0,65 для чистої поверхні сталі У8 при $R_a = 0,63$ мкм за даними різних дослідників. Тому у роботі розроблено методику, експериментальний стенд, та програмне забезпечення для експрес аналізу дійсної залежності $R(T)$. Ця функція є результатом інтерполяції точного поля значень R при різних температурах зразка, отриманих шляхом розрахунку співвідношення теплового потоку на опромінюваній поверхні зразка $q(T)$, який вираховується по дійсному рівню T його нижньої поверхні при розв'язанні лінійної задачі теплопровідності, та потоку випромінювання /у дійсному часі/, які вимірюють системою приладів /Е, Р(1), Ц/. На рис.5/а/ показано графічно оброблені дані вимірювань $R(T)$ для зразка з сталі У8 з чистою поверхнею /1 - W(t); 2 - температура на нижній поверхні зразка T_{np} ; 3 - її розрахункові значення на верхній поверхні T_{hp} ; 4 - $R(T)$ /, на рис.5/б/ - $R(T)$ для зразка з чистою /1/ та окисною поверхнею /2/. Для оцінки важливості одержаних результатів виконано аналіз теплового стану зразка під час лазерного опромінювання при фіксованих рівнях $R=0,15$, $0,65$ та з урахуванням побудованої функції $R(T)$. За модель процесу

правило рішення одномірного нелінійного рівняння теплопровідності

типу $1/\lambda$ з відповідними межовими умовами. Результати розрахунків показали, що $T_{\max}(y=0)$ з урахуванням $R(T)$ вдвічі більша, ніж T_{\max} при $R=0,85$ і вдвічі менша в порівнянні з T_{\max} при $R=0,15$. Крім того, практично відсутня різниця між значеннями $T(y,t)$ для зразка з $R=0,15$ /чиста поверхня/ та при урахуванні $R(T)$ для окисленого зразка. Урахування нелінійності $R(T)$ дозволило отримати нові результати у кінетиці лазерного нагріву. Так, відсутність перегину /за літературними даними/ на залежностях $T(y,t)$ в інтервалі температур $700^\circ < T < 800^\circ \text{C}$, який є свідченням стрибкоподібних змін теплофізичних властивостей /початкове зростання температуростійкості зі зменшенням теплопровідності при $800^\circ < T < 850^\circ \text{C}$ є результатом структурних перетворень у сталі V8 і веде до зниження швидкості нагріву при $700^\circ < T < 726^\circ \text{C}$, а потім її зростання при $850^\circ < T < 900^\circ \text{C}$ / є наслідком лінеаризації функцій $R(T)$ та $\lambda(T)$, що справедливо лише при $T < 500^\circ \text{C}$. Одержані результати підтверджено експериментальними даними. Додатково необхідно зауважити, що вивчення значень $R(T)$ для чистої та окисленої поверхні для $T > 300^\circ \text{C}$ є підставою для рекомендації зміни операції покриття поверхні спеціальними плівками на її підгрів /наприклад, часткою лазерного променя/. Було підтверджено експериментально при частотному режимі опромінювання, коли другий імпульс з періодом $t < 12 \cdot 10^{-6} \text{C}$ значно заглиблює зону термічного впливу /в 3-4 рази/ за рахунок підгріву її першим до $T = 420^\circ \text{C}$ / $R=0,2$ /. Одержані дані використано під час аналізу теплового стану зони нагріву в заготовках з обмеженим тепловідедом [2]. Так, при опромінюванні заготовки з кутом загострення β і розташуванням центра пучка на відстані x_c від верхнього кута, зменшення β від 75° до 30° ($x_c = \beta r/2 = \text{const}$) викликає збільшення ступеня асиметрії теплового поля у куту клина, що є наслідком загіршення теплового потоку, і при $\beta < 30^\circ$ потрібна менша кількість енергії для підтримки процесу нагріву. Для більших значень таке порушення симетрії відбувається при зміщенні центра пучка до вершини кута. Починаючи з деякого значення $x_{\text{кр}}$ може відбуватися пересичення тіла клина тепловою енергією з плавленням його кромки. Так, при $d_0 = 1,2 \text{ мм}$; $W_0 = 1,4 \text{ Дж/мм}^2$ для пучка з нормальним розподілом потужності $x_{\text{кр}}$ змінюється від значення $0,25 \text{ мм}$ для 75° до $0,49 \text{ мм}$ для $\beta = 30^\circ$. Таким чином, для установлених рівнів параметрів пучка випромінювання є деякий інтервал відстаней $x_{\text{кр}} < x_c < x_{\text{кр}}$, при розташуванні на яких центра пучка, гарантується прогрів тіла кута без оплавлення його кромки. Хоча було проаналізовано плоску задачу нагріву, переміщення пучка уздовж кромки кута з швидкістю V змінює лише рівень обмежень x_c . На розмір площини зони змінювання, як свідчать результати обчислювальних експериментів, впливають дві обставини /при інших однакових умовах/ - зменшення енергії на поверхні заготовки із-за "звисяння" частини пучка з її кромки

та заширення теплового потоку у куту клина при наближенні x_0 до $x_{кр}$, що призводить до збільшення глибини ЗТВ, яке відбувається з більшою швидкістю ніж зменшення ширини. Досягнення найбільшого значення площини зони в цих умовах є задачею оптимізації умов опроміювання.

Експериментальна перевірка запропонованої методички дослідження процесу зміцнення проведена для імпульсного $\lambda_{\text{л}}=1,06 \text{ мкм}$ та безперервного $\lambda_{\text{л}}=10,6 \text{ мкм}$ опроміювання поверхонь /чистих та з покриттям/ масивних заготовок і заготовок обмежених розмірів та форми, виготовлених із сталі У8. Межою зони зміцнення визнавалась структура з твердістю 7000 МПа. При розрахунках розмірів та форми зон зміцнення приймалася рівномірний розподіл інтенсивності у пучку випромінювання імпульсного лазера /Квант-15/, а профіль сфокусованого променя описувався функцією Бесселя. Для безперервного випромінювача /ТЛ-1,5/ приймалася нормальний розподіл інтенсивності. У широкому діапазоні режимів опроміювання $W_{\text{л}}=0,9 - 4,8 \text{ Дж/мм}^2$ - для імпульсної обробки, $W_{\text{р}}=17 - 440 \text{ Вт/мм}^2$, $V=0,5 - 5 \text{ м/хв}$ - з неперервним випромінюванням/ розрахунки та експериментальні результати досить близькі: відносна середня похибка передвіщення розмірів зони не перевищує 6,9% по глибині та 4,5% по ширині зони зміцнення у масивних заготовках. При обробці заготовки у вигляді ріжучого клина з кутами загострення 90° та 60° та виходом зміцненої зони на задню поверхню /за умови відсутності оплавлення ріжучої кромки/ розбіжність розрахункових та експериментальних розмірів зон зміцнення не перевищувала 3,7% по T_x глибині та 4,2% - по ширині. Таким чином, підтверджується достатня точність обчислювальних експериментів для прогнозних розрахунків та аналізу температурних полів у заготовці, наведених лазерним опроміюванням.

Коректна постановка задачі оптимізації технологічної операції формування зміцненого шару на поверхні заготовки повинна описувати його еластичності за допомогою таких даних:

- креслення заготовки з визначенням меж зони зміцнення /функцією або координатами точок/ $f_{\text{л}}(x, y, z)$;
- значення температур структурних змін /стаціонарної $A_{\text{с3}}$ та температурного інтервалу $\Delta T(V)$: $A_{\text{с3}} < T_{\text{в}}(x, y, z, t) < A_{\text{с3}} + \Delta T$
- критичні значення швидкостей охолодження $V_{\text{мін}} < \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} < V_{\text{макс}}$ та часу нагріву $t_{\text{н}}: (T_{\text{в}}) > t_{\text{н}}$, або густини потужності випромінювання $W_{\text{р}} = W_{\text{кр}}$, вибраний з умов набуття заданого рівня мікротвердості у ЗТВ;
- крайові умови у вигляді:

$$T_{\text{макс}}(x, y, z, t)|_{x=0} < T_{\text{пл}} \text{ або: } T_{\text{пл}} < T_{\text{макс}}(x, y, z, t) |_{x=0} < T_{\text{н}}$$

$$|y=0$$

$$|y=0$$

$$|z=0$$

$$|z=0$$

якщо передбачається зміцнення шару частково з розплаву. Рішення такої задачі у повному обсязі можливо з умов включення до факторів, що керуються, таких як: $P(E, \tau)$, d_0 , $V(V=S \cdot \dot{V})$ та координати положення центра пучка випромінювання на поверхні заготовки, закону розподілу потужності у поперечному перетині пучка. Оптимізаційна задача вирішується в умовах технічних обмежень на рівні управляємих факторів шляхом мінімізації функції мети:

$$RSQ1 = [T(x, y, z) - F_v(x, y, z)]^2 = \min, \quad /3/$$

при використанні за рівняння зв'язку /1/ з обмеженнями /2/, шляхом відбудови теплового потоку на поверхні заготовки по заданій тепловій історії $F_v(x, y, z)$ та з урахуванням функції $R(T)$ для визначення параметрів пучка випромінювання. Так, при проектуванні технологічної операції зміцнення перодної поверхні прохідних різців $/\gamma = 0; \alpha = 1^\circ; \beta = 80^\circ/$ із сталі У6 з формою поперечного перерізу у вигляді урізаного прямокутного паралелепіпеда з розмірами $x_3 = 2,5$ мм; $y_3 = 150$ мкм; $z_3 = 10$ мм при межах умов $/730^\circ < T_v < 811^\circ\text{C}; T_{\max} < 1500^\circ\text{C}; E < 8$ Дж; $2 < \tau < 6$ мс; $K \cdot \dot{V} < 20$ Гц; $0,4 < W_0 < 3,0$ Дж/мм²; $1,3 < d_0 < 3,6$ мм / були сформульовані функції мети у вигляді /3/, та

$$RSQ2 = [2 T(x, y, z, t) / \partial t - V_{\min}]^2, \quad \text{де } V_{\min} = 10^3 \text{ C/c.}$$

Оптимальні умови, які одержано при розв'язанні задачі з використанням невизначених множників Лагранжа для об'єднання функцій мети та врахуванням технічних обмежень, такі: $E = 6,1$ Дж; $\tau = 6$ мс; $d_0 = 1,8$ мм; $W_0 = 2,1$ Дж/мм²; $V = 9$ мм/с; $S = 0,6$ мм; $\dot{V} = 10$ Гц; $x_3 = 0,76$ мм при нормованому розподілу потужності, який показано на рис.6. Час обробки одного різця становить 1с. дійсні розміри зони зміцнення дорівнюють: $x_3 = 2,30$ мм; $y_3 = 145-159$ мкм; $z_3 = 10$ мм; $\mu = 11$ при $K_p = 0,4$, продуктивність операції $V \cdot b_3 = 20,2$ мм²/с.

Як показали приклади, розроблені та використані методи моделювання та оптимізації технологічних операцій лазерної обробки дозволяють одержувати режими, оптимальні з точки зору досягнення встановлених показників, здебільшого кількісного характеру: номінальний розмір, чи його статистичний аналог - середнєарифметичне значення; рівня показників форми, шорсткості оброблених поверхонь, продуктивності та ін. Однак, результати технологічного процесу є імовірносними величинами, і для повного їх опису потрібне знання параметрів розподілу. Такі детерміновані величини характеризують процес обробки з позицій відтворюваності результатів, що визначають досягаєму точність обробки. Це питання є класичним для технології металообробки, для його вивчення застосовують експериментальні та аналітичні методи. Як показав аналіз якісних результатів різноманітних операцій лазерної обробки, процес взаємодії променя з речовиною можна віднести до процесів з високим рівнем випадкових завод. Для експериментальних досліджень

цих показників потрібно використання спеціальних планів /види еволюційного планування/. До того ж, кібернетичні моделі, які є результатом такого методу досліджень, не дозволяють аналізувати фізичні явища процесу та визначити причини низької відтворюваності результатів. За цих міркувань розробка розрахунково-аналітичного методу прогнозу точності процесів є цілком виправданим. Якщо представити ТОС у вигляді деякої перетворюючої системи, до якої входять сукупність засобів /інструмент, технологічне оснащення, обладнання та заготовка/ та заходів, і яка служить для виконання технологічної операції, то на підставі принципу суперпозиції кожен з k якісних результатів обробки може бути подано у вигляді лінійної /або лінеаризованої/ комбінації початкових нестабільностей:

$$\tau_k = a_{k0} + \sum_{i=1}^n a_{ki} \cdot x_i + \sum_{j=1}^m b_{kj} \cdot y_j + \sum_{z=1}^l c_{kz} \cdot z_l \quad /4/$$

з числовими характеристиками:

$$\tau_k = m\tau_k \pm 3[D\tau_k]^{1/2}$$

$$m\tau_k = a_{k0} + \sum_{i=1}^n a_{ki} \cdot m_{xi} + \sum_{j=1}^m b_{kj} \cdot m_{yj} + \sum_{z=1}^l c_{kz} \cdot m_{zl}$$

$$D\tau_k = \sum_{i=1}^n a_{ki}^2 \cdot D_{xi} + \sum_{j=1}^m b_{kj}^2 \cdot D_{yj} + \sum_{z=1}^l c_{kz}^2 \cdot D_{zl} \quad /5/$$

де: $a_{k0}, a_{ki}, b_{kj}, c_{kz}$ - передаточні коефіцієнти перетворюючої системи, які відбивають вплив відповідної початкової нестабільності на вивчаємий показник якості; x_i, y_j, z_l - початкові нестабільності заходів та засобів, використаних в ТОС. Для спрощення функцій /5/ взаємозалежність початкових нестабільностей досягнуто за рахунок достатньої деталізації сумарної похибки при II структурному аналізі. Для визначення коефіцієнтів рівнянь /4/ та /5/ використано дані аналітичного або математичного моделювання процесів.

З метою визначення складових частин сумарної похибки та її числових характеристик, а також джерел їх появи виконано структурний аналіз сумарної похибки для базових операцій лазерної обробки. З технологічних позицій точність обробки залежить від величини поля розсіяння розмірів деталей у партії, яка визначається сумарною похибкою обробки. Основними її складовими є похибки, які створені недосконалістю та нестабільністю інструмента та обладнання, помилками технологічних заходів, нестабільністю взаємодії випромінювання з матеріалом заготовки. Разом з класифікацією елементарних похибок виконано аналіз джерел їх появи, які було визначено у результаті досліджень особливостей роботи лазерного обладнання, специфіки побудови технологічних операцій лазерної обробки, вивчення якостей заготовки. Розглянуто сумарну похибку розмірних показників операцій: діаметрів отворів, ширини паза чи різа, розміру заготовки після її вирізки лазерним променем, ширини та

глибини зони зміцнення. Враховуючи, що деякі операції виконуються при імпульсному або безперервному опромінюванні, від твердотілого чи газозного лазера, доцільним є окремих розгляд тих показників процесу, які змінюються при зміні типу випромінювача.

Операції розмірної обробки, деякі контурної різки та зміцнюючої обробки виконуються при імпульсному опромінюванні. Похибки, які вносить інструмент, складаються з похибок, викликаних нестабільностями пічкової структури лазерного імпульсу, його енергії, часових характеристик та розходження. Для газолазерної контурної різки додаються похибки від нестабільності частоти подачі імпульсів, направлення оптичної осі пучка та тиску технологічного газу. Іншими джерелами /без уточнення розподілу по окремим показникам нестабільностей/ є коливання розмірних характеристик резонатора, неоднорідності поля накачки у активному середовищі, нестабільність енергії накачки у ФЛН, коливання температурного режиму роботи випромінювача, нестабільність роботи його елементів та блоку живлення, системи подачі технологічного газу. Для газових лазерів джерела нестабільностей децю інші у зв'язку з іншими принципами створення та збудження активного середовища: коливання складу суміші газів /при її підготовці та злид старіння/, коливання витрати та тиску у ГРК, нестабільність електричної енергії накачки, нестійкість розряду у ГРК випромінювача, резонатора резонатора вслід термодформаций та вібрацій його елементів. У операціях зміцнюючої обробки порівняно з розмірною при формуванні зміцнюючого шару з системи окремих зон потрібно брати до уваги нестабільність частоти подачі імпульсів.

При безперервному опромінюванні перелік похибок, які вносить інструмент, децю скорочується: похибки від нестабільності потужності випромінювання та розходження пучка для зміцнюючої обробки. Інструмент для газолазерної різки більш складний, тому кількість похибок збільшується за рахунок похибок від нестабільності направлення осі пучка, коливань тиску технологічного газу та положення сопла для його подачі відносно поверхні заготовки /у роботі використовувалися плоскопаралельний промінь та сопла циліндричної форми/. Джерела їх виникнення майже ті ж самі, що й при імпульсному режимі роботи газозного лазера, причинами коливання відстані між поверхнею заготовки та соплом є нестабільність товщини заготовки та її перекид при розміщенні на столі або недостатня точність нівелювання поверхні останнього або направляючих для вузлів обладнання, які по розміщуються під час операції /портал, каретка/.

Надоліки технологічних заходів, які відповідні за другу групу елементарних похибок, зв'язані з процесом фокусування пучка випромінювання на заготовку, настройкою технологічного /енергетичного/ режиму обробки та дрейфом останнього, установкою і

закріпленням заготовки. В операціях контурної різки та зміцнюючої обробки відтворюваність результату залежить також від нестабільності швидкості відносного переміщення пучка та заготовки. Джерелами цих нестабільностей є: суб'єктивні якості оператора, наявність ширини спектра генерації випромінювача, помилки при настройці оптичної системи /хроматична аберація, глибина різкості та шорсткість поверхні заготовки при візуальній настройці, коливання товщини заготовки при незбіжності технологічних баз/, помилки та похибки пристроїв для контролю та управління режимами обробки, перекіс та зміщення заготовки при її розташуванні на столі ЛТО, похибки приводу стола чи портала.

На стабільність взаємодії променя та заготовки впливають ті її властивості, що змінюють від операції до операції або протягом її - тошловий стан. Так, при розмірній обробці та імпульсній різці це - коливання товщини заготовки та різка обробляемість матеріалу. При різці безперервним променем /частіше СО₂-лазера/ треба виділити з остаточної нестабільності - коливання поглинаючої властивості поверхні заготовки, а у операціях зміцнюючої обробки, які виконуються при ще знижених рівнях густини потужності, на відтворюваність розмірів зон зміцнення додатково впливає стабільність різня критичних температур /початку та кінця структурних перетворень/. Причинами цих нестабільностей є похибки попередніх операцій /в тому числі термічних/, результатами яких є не тільки нестабільності розмірів, а також і шорсткості поверхні, її покриття окисними плівками, мастилом, грязю та ін.; нестабільності структури та складу матеріалу заготовки, від чого залежать його теплотехнічні властивості, коливання товщини та складу покриття, якщо воно використовується у операції.

Аналіз розроблених залежностей між рівнем початкових нестабільностей та похибок об'єктів ТОС показав, що до їх складу, крім ритмамичного використаному обладнанню показників : помилок управління вхідними факторами /помилки настройки різня напруги чи струму, тиску робочої газової суміші та технологічного газу / та відроблення його агрегатами установлених значень параметрів /варіації напруги або струму накачки, швидкості прокачки газової суміші через ГРК випромінювача, температури теплоносія з системи охолодження елементів лазера та фокусуєчих систем, швидкості робочої подачі стола або пор зла/, входять фактори, що керуються та що контролюються: режими обробки, умови опромінювання, властивості заготовки. Тобто, від різня параметрів пучка випромінювання, умов обробки та роз'ївів і матеріалу заготовки залежать як кількісні, так і якісні результати технологічної операції, що декілька ускладнює процес проектування, але дає можливість при оптимізації режимів обробки враховувати якісні критерії. На рис.7 показ-

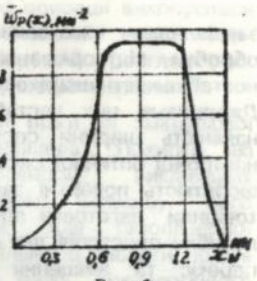
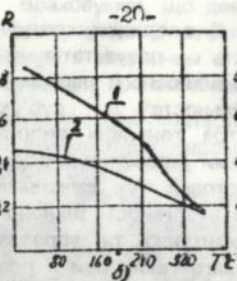
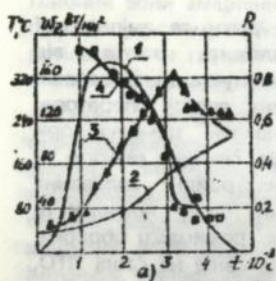
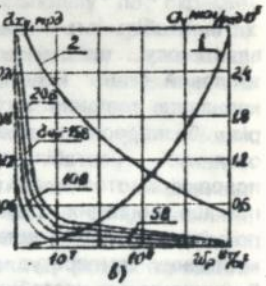
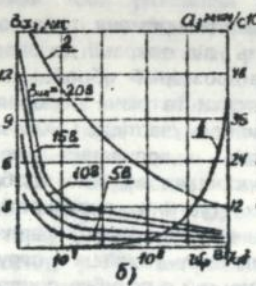
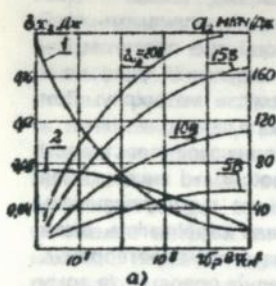


Fig. 5

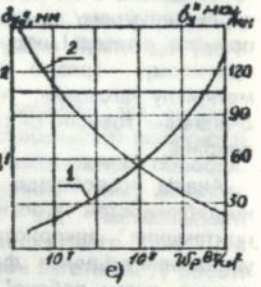
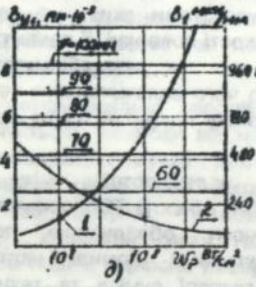
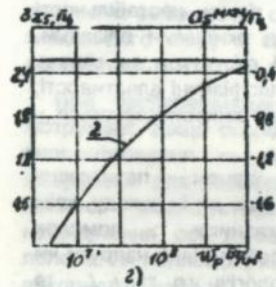
Fig. 6



a)

b)

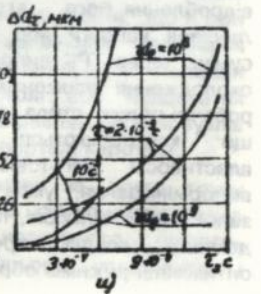
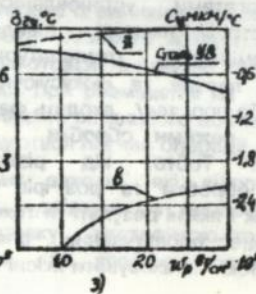
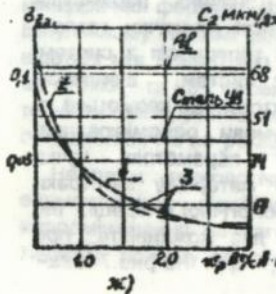
c)



2)

3)

e)



x)

y)

z)

Fig. 7

зано, як приклад, деякі з показників нестабільностей об'єктів ТОС з імпульсним твердотільним лазером у залежності від рівня комплексної характеристики процесу - густини потужності випромінювання / δx_2 - характеристика нестабільності імпульсної енергії, δx_3 - тривалості, δx_4 - розходження, δx_5 - частоти подачі імпульсів; δy_1 - похибки фокусування пучка випромінювання, δy_4 - коливань положення заготовки; δz_2 - нестабільності її поглинаючої здібності та δz_3 -рівня критичних температур/. На рис.7(и) показано залежність систематичної похибки від дії задньої частини імпульсу T_3 , від її тривалості. Ураховуючи, що рівень W_p залежить від значень ряду факторів процесу, необхідно визначити складність завдання мінімізації величини сумарної похибки шляхом скорочення її складових частин.

Для визначення величин перетвірних коефіцієнтів a_i, b_j та c_l /4/, які характеризують відчутливість ТОС на її збурення нестабільностям: своїх об'єкта, необхідно скористатися моделями процесу, розраховуючи приріст його вихідних характеристик при коливанні того чи іншого параметра. Для базових технологічних операцій розроблено залежності для розрахунку коефіцієнтів при обробці імпульсним та безперервним випромінюванням. На рис.7 показано ці залежності, які побудовано для найбільш характерних режимів обробки /1 - розмірна обробка, 2 - газолазерна різка, 3. - зміцнююча обробка/. Залежність рівня коефіцієнтів від режимів обробки ще більш ускладнює задачу мінімізації сумарної похибки діями на окремі її складові.

Розроблена модель точності процесу лазерної обробки /4/ описує лише похибки розмірів елементарних результатів обробки / Δd - похибка діаметра отвору; Δb - ширини різки; Δb і Δz - ширини та глибини зони зміцнення/. Якщо для розмірної обробки отворів або пазі цей елемент є кінцевим результатом, то для операцій контурної вирізки заготовок або при зміцнюючій обробці площин з'являються додаткові похибки, зв'язані з вибраною схемою формування контуру заготовки чи зміцненого шару. Так, при двусторонній вирізці заготовки з листа шириною B її похибки складаються /рис.8а/ з похибки ширини різки Δb , похибок схеми /при імпульсному опроміненні/ $\Delta V_{сх}$, та похибок контурного переміщення. Як і модель/4/ величина ΔV може бути виражена через комбінацію складових частин, яка лінеаризується розкладанням у ряд Тейлора, обмежуючись першими похідними: $\Delta V = A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i X_i + \sum_{j=1}^3 B_j Y_j$ - з числовими характеристиками m $\Delta V = A_0 + \sum_{i=1}^3 A_i m X_i + \sum_{j=1}^3 B_j m Y_j$; $D \Delta V = \sum_{i=1}^3 A_i^2 D x_i + \sum_{j=1}^3 B_j^2 D y_j$, де: $A_0 = \Delta V_{сх} = b n (1 - [1 - (\frac{V}{V_0} b n)^2]^{1/2})$ - систематична складова, $X_1...X_3$ - нестабільності складових частин похибки, пов'язаних з дією пучка випромінювання /ширини різки $b n$, частоти подачі імпульсів V ; положенням пучка на поверхні заготовки, яке змінюється від коливань напрямлення його

осі, Y_1 - нестабільність швидкості різки V . Коефіцієнти A_1 та B_1 визначаються за рівняннями: $A_1 = \partial \Delta V_{сх} / \partial b$; $A_2 = \partial \Delta V_{сх} / \partial V$; $A_3 = F$; $B_1 = \partial \Delta V_{сх} / \partial V$. Таким же чином формуються загальні похибки операції при площинній зміцнюючій обробці за винятком того, що заповнення зони зміцнення відбувається за кілька n / проходів променя з відстанню S , та додатково змінюється глибина шару залежно від вибраної схеми заповнення профілю площини /рис.8б/: $\Delta B = \Delta b + \Delta V_{сх} + (n-1)\Delta S$; $\Delta Z = \Delta z + \Delta Z_{сх}$ або після лінеаризації: $m \Delta B = A_1 \alpha + \sum_{i=1}^n A_1 i X_i + \sum_{j=1}^n B_1 j Y_j$; $D \Delta B = \sum_{i=1}^n A_1 i^2 D X_i + \sum_{j=1}^n B_1 j^2 D Y_j$; $m \Delta Z = A_2 \alpha + \sum_{i=1}^n A_2 i X_i + \sum_{j=1}^n B_2 j Y_j$; $D \Delta Z = \sum_{i=1}^n A_2 i^2 D X_i + \sum_{j=1}^n B_2 j^2 D Y_j$, де: $A_1 \alpha = m \Delta b + m \Delta V_{сх} + m \Delta S(n-1)$; $A_2 \alpha = m \Delta z + \Delta Z_{сх}$; $Z_{сх} = b n p / 2(1 - (S/d + b n p)^2 / 4z^2)$; $S_d = S + V^2 / 4z^2 S$; $b n p = (b^2 + 4z^2) / 4z$.

Інші коефіцієнти розраховуються за приведеними вище рівняннями. Прогнозані розрахунки похибки технологічної операції за розробленими методиками та залежностями дали результати, дуже близькі до дійсних. Так, величина сумарної похибки операції обробки отворів $\varnothing 0,35$ мм в заготовках із сталі 18Х2Н4ВА товщиною 2 мм дорівнювала: розрахована $\Delta d_p = 45,5 \pm 15,7$ мкм; експериментальна $\Delta d_e = 51,6$ мкм; операції різки імпульсним променем $\Delta b_p = 32 \pm 23,2$ та $\Delta b_e = 66$ мкм; безперервним - $\Delta b_p = 45,9 \pm 93,6$ та $\Delta b_e = 183$ мкм. Ураховуючи, що експериментальне значення не включає систематичну складову, збіг результатів добрий. Передащення величини сумарної похибки операції не обмежує можливостей розробленого методу. Доцільно його використовувати для аналізу відтворюваності резул. татів та пошуку засобів усунення або скорочення похибок. На рис.9 показана структурна діаграма сумарної похибки ширини B вирізаної заготовки при імпульсному опромінуванні. Її величина складається з двох частин: похибки ширини різку $\Delta b = 32 \pm 23,2$ мкм та похибки формування контуру заготовки $\Delta V_{сх} = -0,2 \pm 61$ мкм, тому дійсний розмір заготовки /при двосторонній обробці/ дорівнює $B_d = B_n - 31,8 \pm 70$ мкм. Аналіз діаграми показує, що більшу частину випадкової складової формують нестабільності енергетичних /28,1%/ , кутових /22,2%/ та частотних /10,4%/ характеристик пучка випромінювання; важливість енергетичного параметру підкреслюється значною величиною похибки, яку визвано помилками настройки його рівня /16%/. Друга група зв'язана з помилками заходів: фокусування /систематична складова $m \Delta b = 32$ мкм, випадкова 9,4%/ та розміщення і закріплення заготовки - 13,2%. Невеликий вклад схемних похибок $m \Delta V_{сх} = 0,2$ мкм; $\delta_{сх} = 0,015$ мкм/ пояснюється низьким рівнем коефіцієнта перекриття $K_p = S/d = 0,072$, який з умов наскрізної обробки кількома імпульсами набагато нижчий від рекомендованого значення 0,3 - 0,4. Найбільший вклад у сумарну похибку ΔB вносить коливання осі пучка випромінювання, його статистична характеристика дорівнює $\delta_{\Delta b} = 22$ мкм.

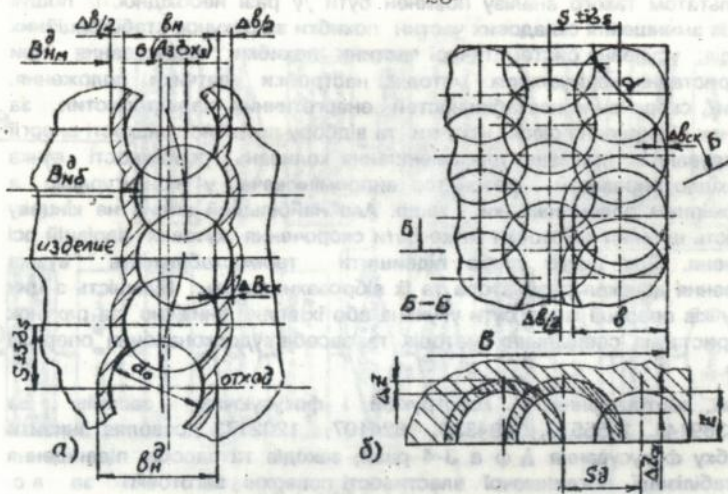


Рис. 8

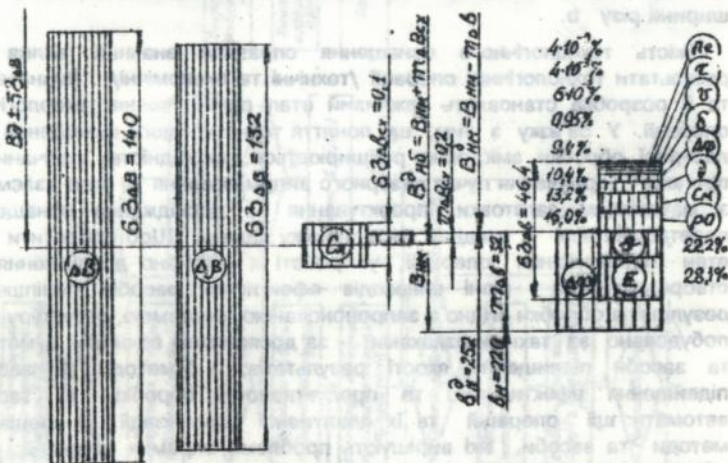


Рис. 9

Результатом такого аналізу повинен бути /у разі необхідності/ пошук шляхів зменшення складових частин похибки за рахунок стабілізаційних заходів: усунення систематичної частини похибки фокусування при використанні невізуальних методів настройки /датчики положення, упори/, скорочення нестійкостей енергетичних характеристик за рахунок підвищення рівня накачки та відбору потрібної кількості енергії фільтрування променя; для зменшення коливань розбіжності пучка необхідно перевести резонатор випромінювача у конфігурацію з рівномірним полем накачки, тощо. Але найбільший вплив на кінцеву точність ширини заготовки може дати скорочення кутових варіацій осі променя. Для цього треба підвищити термостабільність вузлів кріплення дзеркал резонатора та їх віброзахисеність. Більшість з цих недоліків операції може бути усунена або їх вплив знижено за рахунок використання спеціальних методів та засобів удосконалення операції різки.

Так, застосування конструкцій фокусуючих засобів за а.с.1389141, 1455570, 694330, 824107, 1202173 дозволяє знизити похибку фокусування $\Delta \phi$ в 3-4 рази; заходів та засобів підвищення та стабілізації поглинаючої властивості поверхні заготовки за а.с. I.309731, 745204, 1349124 - суттєво знизити вплив коливань рівня її шорсткості, ступеня очищення на рівень поглинання енергії випромінювання; адаптивної системи за а.с. N958060 - вилучити вплив коливань товщини заготовки на рівень відтворюваності ширини різку b.

Якість технологічного оснащення справляє значний вплив на результати технологічної операції /технічні та економічні/. Визначення та її розробка становлять важливий етап проектування технологічної операції. У зв'язку з тим, що поняття технологічного оснащення для лазерної обробки змістовно розширюється необхідністю втручання у процеси формування пучка лазерного випромінювання та його взаємодії з матеріалом заготовки, проектування та дослідження оснащення передбачується у складну дослідницьку задачу. Щоб спростити цей етап проектування операції, у роботі виконано дослідження по створенню на рівні винаходів ефективних засобів поліпшення результатів обробки згідно з запропонованою системою, структуру якої побудовано за такими ознаками: - за досягаємим ефектом: а/методи та засоби підвищення якості результатів; б/методи та засоби підвищення ефективності та продуктивності обробки; в/ засоби автомати: зції операцій та їх адаптивної організації; г/ спеціальні методи та засоби, які вирішують проблеми окремих операцій; - за об'єктом впливу в ТОС /інструмент, технологічні заходи, заготовка/; - за ступенем розробленості або дослідженості.

Практично всі засоби пройшли конструкторську розробку, лабораторну або промислову апробацію, деякі впроваджено, у тому числі при випуску серійного ЛТО як супутнє ім технологічне оснащення.

Результати досліджень та розробок, виконаних у дисертації, складають банк даних, а розроблені методики та алгоритми - програмну частину, тобто основу для створення системи автоматизованого проектування технологічної операції лазерної обробки /САПР ТО/ /рис.10/, принципами якої є: системна єдність, розвиток, сумісність ручного та автоматизованого проектування, мінімальний зв'язок зі зовнішнім середовищем, функціонування у масштабі дійсного часу. Її складовими компонентами є: а/ підсистема проектування ТО; б/ інформаційне забезпечення у вигляді банку даних, який включає 5 баз даних та підсистему - СУБД; в/ системна, базові та підпрограми /"Моделювання", "Оптимізація", "Точність"/, необхідні для функціонування САПРТО.

г/ компонентами технічного забезпечення системи є ПК IBM 386 з периферією /монітор, графобудівник, ЦДУ, сканер/, а також вимірювальна підсистема для автоматизованого уведення експериментальних результатів.

Розвиток САПР за рахунок розширення та удосконалення її функцій відбувається при поповненні БДН1 новими євросними операціями, БДН2 та БДН3 - розробленими алгоритмами моделювання, оптимізації, експериментальними планами, та ін., БДН4 - результатами розробки та експериментальної перевірки нового або модернізованого оснащення, БДН5 - параметрами нових ЛТО та результатами їх модернізації;

Результати, які одержано у роботі, було використано при розробці і впровадженні у виробництво реальних технологічних процесів та відповідного обладнання і оснащення.

а/ На ряді підприємств та установ м.Київ /ВО "Кристал", "Арсенал", ім.Артема, завод N37, Інститут "Оріон", ЕМП, ІТТФ та ІПЛ/ та СНД /заводи медичної техніки мм.Ворсма, Тюмень, ЗПА м.Барнаул/ впроваджено розмірну обробку отворів у заготовках із різних матеріалів:

- у дфрагмах із сталей та чистих металів /Ti, Ta, Mo, W, Pt/ отвори \varnothing 0,005 - 0,030 / \pm 0,002 - 0,004/мм; розроблена та впроваджена операція є єдиним промисловим методом обробки мікроотворів, який має продуктивність у 150-200 разів вище існуючих;
- у корп.сах форсунок дизелей, виготовлених з жаростійкої сталі 18X2H4BA отвори \varnothing 0,25 - 0,40 / \pm 0,01/мм циліндричної форми /



$\Delta\phi=0,02/$ глибиною 2-3мм, застосування адаптивної системи обробки дозволило скоротити брак з 41 до 11%;

- у головках ін'єкційних голок з нагартованої латуні ЛС-59 отвори кінцевого профілю $\varnothing 0,4 - 0,8H12$ глибиною до 4 мм за умови їх масового виробництва/понад 50 млн.штук на рік/; форма та точність, що задано, забезпечуються оптимізацією режиму обробки та використанням активного контролю розмірів пневмопристроєм.

б/ Для ряду підприємств /ВО "Арсенал", завод "Октава" та радіовимірвальних приладів, м.Вільнюс/ розроблено технологічні операції контурної різки:

- заготовок з електротехнічної кераміки; операція спроектована за допомогою розробленої САПР, оптимізована на режимах обробки $/E=3Дж, F=50мм, F=-0,5мм, n=4; V=2мм/с$ для $\delta=0,3мм$ та $0,3$ для $\delta=2мм/$. Високу якість обробленої поверхні досягнуто при реалізації об'ємного механізму поглинання енергії випромінювання підбором його довжини хвилі: для $\lambda_g=0,6943$ мкм /рубін/ приведений коефіцієнт поглинання $B < 0,1$, продуктивність операції зросла у 150 разів;

- великий обсяг досліджень було виконано при розробці та запровадженні технологічної операції бездефектної вирізки виробів із слюди $/\delta=0,02 - 0,3$ мм/. Розроблено та виготовлено унікальний технологічний комплекс з трьома випромінювачами: на $CO_2 / \lambda_g=10,6$ мкм/ - для різки слюди та ЗІГ-структур; на $N_2 / \lambda_g=0,3377$ - для вирізки виробів з металізованої слюди; на рубіні $/ \lambda_g=0,6943/$ - для обробки заготовок з листової бронзи ЕрБ2 та кераміки 22ХС. Технологію, обладнання та пристрій для електростатичного обжиму заготовок розповсюджено по підприємствах галузі /виробництва РВП/.

в/ Вперше освоєно на підприємстві "Смарагд", м.Київ, операції лазерного надрізу та розколу кристалів алмазу, формування рундлісту, вони дістали широке розповсюдження на підприємствах галузі внаслідок підвищення продуктивності обробки, суттєвого зниження безповоротних утрат дорогоцінної сировини, можливості використання порочних кристалів алмазу у діамантовому виробництві. Створені дільниці, запроваджені процеси лазерної обробки дали змогу одержати великий економічний ефект /до 110 млн.інвалютних карбованців/.

ВИСНОВКИ

1. Внаслідок комплексних досліджень уперше запропоновано науково обґрунтовану методологію розробки лазерних технологічних процесів, яка базується на класичних принципах технології машинобудування, що дозволило створити інженерну методику проектування операцій лазерної обробки з формалізацією прийнят-

базових рішень та з використанням можливостей обчислювальної техніки.

2. Виконано параметричний аналіз та синтез різних процесів лазерної обробки, що дозволило створити основи управління технологічними операціями з урахуванням особливостей інструмента (пучка лазерного випромінювання), фізичних процесів обробки, а також її розмірних та якісних результатів, показників продуктивності. Дані параметричного аналізу, які складають інформаційну базу проектування технологічних операцій, дають можливість спростити та формалізувати деякі його етапи: формування факторного простору (паралель факторів, що керуються; рівні тих, що фіксуються); вибір виду моделі та методики досліджень; визначення пріоритетів для управління процесом або для розробки технологічного оснащення.

3. Розроблено аналітичний метод прогнозного розрахунку сумарної похибки обробки, а також моделі точності розмірних характеристик базових технологічних операцій, які дозволяють не тільки виділити її систематичну та випадкову складові, але також структурувати останню за об'єктами ТОС та виняти джерела нестабільностей системи. Установлено, що величина сумарної похибки, а також її складових визначаються як конструктивно-технологічними параметрами елементів ТОС (71%), так і режимом її функціонування (29%). Це дозволяє рекомендувати ось такі шляхи підвищення якості операцій: оптимізація режимів обробки за умови використання сумарної похибки як функції мети; скорочення кількості та рівня її складових за рахунок застосування додаткових (не режимних) методів удосконалення технологічної операції.

4. Установлено, що для коректного моделювання і оптимізації операцій розмірної обробки та контурної різки, найбільш комплексних за набором фізичних явищ, необхідно використовувати експериментальні методи. Каталог планів, що розроблено, дозволяє за формальними ознаками (кількість вагомих параметрів, що керуються; кількість вихідних показників) виконувати планування експериментальних досліджень (за D-оптимальними планами - для кількісних та G - оптимальними - для якісних результатів) з урахуванням особливостей процесу лазерної обробки та ступеня його вивченості (виду постульованої моделі). Для розв'язання багатокритеріальних задач ефективно використання оптимізаційних методів з формуванням узагальненої функції мети.

5. При розробці методики і математичного забезпечення аналізу та проектування операцій зміцнюючої обробки обчислювальними експериментами встановлено, що коректні результати можна отримати за умови використання чисельних методів розв'язання теплових задач,

які зважають на дійсні температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу та поглинаючої здатності заготовки. Для визначення останньої уперше розроблено експрес - методику та стенд; результати, що одержано, дозволили уточнити теплову історію зони нагріву, її зв'язок зі структурними перетвореннями у матеріалі. Під час розв'язання оптимізаційної задачі формування зміцненого шару заданої поперечної форми, як додатковий параметр, що керується, необхідно використовувати розподіл інтенсивності у пучку випромінювання.

6. Уперше на різні винаходи створено комплекс технологічного оснащення, який систематизовано за досягаємиим ефектом, об'єкту діяння у ТОС та ступенем дослідженості. Установлено, що для підвищення ефективності розробки оснащення того чи іншого призначення, об'єкт діяння необхідно визначати на підставі результатів аналізу структури сумарної похибки обробки (для засобів підвищення якості) або відповідно до рангових діаграм параметрів процесу; відповідно до останніх також визначається найбільш ефективний параметр об'єкту ТОС, що керується.

7. Методи досліджень, моделювання та оптимізації, що розроблено, а також їх результати складають інформаційну, а алгоритми, що використано, - програмну основи для створення інженерної (формалізованої) методики проектування технологічної операції у вигляді САПР ТО, застосування якої для розробки реальних технологічних процесів, оснащення та обладнання дозволило під час упровадження лазерної обробки на ряду підприємств України та СНД (ВО "Арсенал", "Кристал", "Ім.Артема"; заводах "Смарагд", "Індуктор", медичної техніки, радіовимірвальних приладів та ін.) шляхом створення дільниць та лабораторій одержати економічний ефект понад 1,0 млн. карбованців на рік (у цінах до 1991р.).

Основні положення дисертації сформульовано у наступних роботах:

1. Коваленко В.С., Котлярів В.П., Дятел В.П. Застосування лазерів у машинобудуванні. - Київ: Вища школа, 1988. -162с.
2. Довідник по технології лазерної обробки /Коваленко В.С., Котлярів В.П., Дятел В.П. та ін.- Київ: Техніка, 1986.-167с.
3. Котлярів В.П., Акімов В.Л. Використання лазерної технології у сучасному виробництві.- Л.: ЛДНТП, 1989.-49с.
4. Котлярів В.П., Романенко В.В., Черненко В.С. Прогресивні технологічні процеси лазерної обробки матеріалів.- Київ: Знання, 1963.-16с.

5. Лазерна обробка на матеріаліте /Коваленко В.С., Котляров В.П., Дятел В.П. та ін.- Софія: Техніка, 1988.-184с.
6. Об оцінюванні ерозії металів та карбідів при обробці лазерним випромінюванням /Г.В.Самсонов, А.Д.Верхотуров, В.П.Котляров та ін. - Електронна обробка матеріалів, 1973, 6, с.5-8.
7. Закономірності руйнування металів при їх обробці випромінюванням ОКГ /Г.В.Самсонов, А.Д.Верхотуров, В.П.Котляров та ін. Електронна обробка матеріалів, 1975, 5, с.10-17.
8. Коваленко В.С., Котляров В.П., Дюмін В.В. Аналіз похибки при лазерній обробці металів.-Технологія та автоматизація машинобудування, 1976, 17, с.53-60.
9. Коваленко В.П., Черненко В.С., Котляров В.П. Вплив лазерного опромінювання на структуру та властивості сталей. - Зб.:Нові методи зміцнення сталей, Київ: Техніка, 1977, с.9-11.
10. Коваленко В.П., Котляров В.П., Снегс В.Л. Лазерна розмірна обробка у дизельбудуванні. - Праці ЦНДДІ, Л.: 1979, т.75, с.144-155.
11. Автоматизація операцій лазерної розмірної обробки./ В.С.Коваленко, В.П.Котляров, М.І.Анякін- Зб.: Вісник КПІ, Київ: Вища школа, 1982, 18, с.27-31.
12. Коваленко В.П., Котляров В.П., Анякін М.І. Методика управління параметрами лазерного випромінювання. - Технологія та організація виробництва, Київ: УкрНДПІ, 1984, 1, с.48-50.
13. Коваленко В.П., Котляров В.П., Анякін М.І. Лазерне обладнання для обробки точних отворів. - Електронна обробка матеріалів, 1984, 3, с.78-81.
14. Коваленко В.П., Котляров В.П., Анякін М.І. Оптимізація процесу лазерної обробки отворів у корпусах ін'єкційних голок. - Технологія та автоматизація машинобудування, 1984, 34, с.51-57.
15. А.с.№894330. Засіб для лазерної обробки /В.П.Котляров, В.С.Коваленко, 1978.
16. А.с.№809731. Спосіб обробки матеріалів лазерним випромінюванням / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, 1980.
17. А.с.№965284. Лазер / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, В.В.Романенко, 1981.
18. А.с.№824107. Спосіб візуального фокусування оптичних систем на об'єкт / В.П.Котляров, В.С.Коваленко, 1979.
19. А.с.№1125872. Спосіб лазерної пробивки отворів / В.С.Коваленко, В.П.Котляров, М.І.Анякін, 1983.
20. А.с.№1202176. Спосіб газолазерної різки горючих матеріалів /В.П.Котляров, В.С.Коваленко, В.В.Романенко, 1986.
21. А.с.№1711557. Аналізатор пучков лазерного випромінювання /В.П.Котляров, Л.Ф.Головко, 1990.
22. А.с.№1780962. Фокусуючий вузол ЛТО /В.П.Котляров, А.О.Івановський, Ю.О.Сорокін та ін., 1982.

23. А.с. N957508. Спосіб обробки матеріалів лазерним випромінюванням /В.П.Котляров, 1984.
24. Коваленко В.С., Котляров В.П., Анякін М.І. Проектування та оптимізація операцій зміцнюючої лазерної обробки.- Електронна обробка матеріалів, 1995, 1
25. Коваленко В.С., Котляров В.П., Анякін М.І. Удосконалення способів фокусування оптичних систем ЛТО.- Хімічне машинобудування, 1984, 40, с.61-68.
26. Котляров В.П., Косоваленко Ю.В. Визначення режимів лазерної обробки мікроотворів.- Електронна обробка матеріалів, 1984, 6, с.11-13.
27. Коваленко В.С., Котляров В.П., Анякін М.І. Експериментальне дослідження якісних результатів обробки. - Технологія та автоматизація машинобудування, 1985, 36, с.57-65.
28. Котляров В.П. Шляхи проектування реальних процесів лазерної розмірної обробки. - Зб.: Електрофізикохімічні та комбіновані методи обробки, Пенза: НТТ "Машпром", 1984, с.15-18.
29. Котляров В.П. Методи підвищення якості лазерної обробки матеріалів, 1986, 2, с.5-13.
30. Котляров В.П. Поверхнева опоряджувально-зміцнююча обробка з лазерним опромінюванням. - Електронна обробка матеріалів, 1987, 1, с.16-20.
31. Котляров В.П. Оцінка рівня точності лазерної розмірної обробки.- Зб.: Застосування лазерів у науці та техніці, Омск: НТС Машпром, 1985, с.58-60.
32. Коваленко В.С., Котляров В.П., Анякін М.І. ОКГ для ЛТО.-Зб.: Електрохімічні та електрофізичні методи обробки матеріалів, - Тула: ТПІ, 1985, с.31-35.
33. Котляров В.П., Анякін М.І., Іващенко О.М. Вплив реального поглинання випромінювання на характер нагріву. - Зб.: Застосування лазерів у науці та техніці,- Омск: НТС Машпром, 1988, с.40-42
34. Котляров В.П., Акімов В.Л., Борисейко Г.І. Розширення можливостей лазерної зміцнюючої технології.- Лазерна технологія, ВІСНУС: ІФАНД, 1988, 6, с.65-66.
35. Вибір режимів лазерної обробки отворів уке-аміці/В.С.Коваленко, В.П.Котляров, Лі Жу Сін та Ін.Електронна обробка матеріалів, 1988, 6, с.81-83.
36. Котляров В.П., Акімов В.Л. Можливість використання лазерної техніки у ГВС.- Зб.: Сучасні проблеми технології машинобудування, М.:МВТУ, 1986, с.128-130.

SUMMARY

Kotlyarov V.P. Base technological principles for laser machining operations design.

Dissertation for degree of doctor of technical science on speciality 05.03.07.-processes of laser, and physicotchnical machining and 05.02.08.-technology of machinbuilding.

The dissertation wich contains results of theoretical and experimental researches of laser processing technology is defended. Developed technological principles of investigating method (factor analysis of the process, machining errors analysis, modeling and optimization of technological operations, technological equipment design) may be served as technical and information base for for formal procedure of technological operation design in CAM. Industrial application of developed operations is realized.

АННОТАЦИЯ

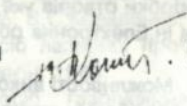
Котляров В.П. Технологические основы проектирования операций лазерной обработки.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.03.07. - процессы лазерной и физико-технической обработки и 05.02.08. - технология машиностроения

Защитается диссертация, которая содержит результаты теоретических и экспериментальных исследований технологического процесса лазерной обработки. Разработанные технологические основы исследованного метода (параметрический анализ процесса, анализ погрешностей обработки, моделирование и оптимизация технологических операций, разработка технологической оснастки) представляет собой техническую и информационную базу для формализованной процедуры проектирования базовых технологических операций в рамках созданной САПР. Осуществлено промышленное внедрение разработанных операций.

Ключові слова: технологія обробки, лазер, технологічна операція, технологічна оснастка, проектування.

Пошукувач



В.П.Котляров

21. А.С.Н171157 Аналізатор, Бухарин М.В., Котляров В.П., Савицкий В.П., 1980
22. А.С.Н170262 Инженерное дело, Котляров В.П., 1980
А.С.Н170262 Инженерное дело, Котляров В.П., 1980

КНИ.17.03.95.Зам.167-100.

448847

Ab 32.370

AB 32.370