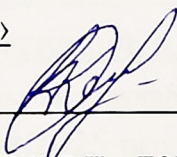


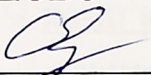
Вінницький національний технічний університет
Факультет інформаційних електронних систем
Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Бакалаврська кваліфікаційна робота на тему:
«Комп'ютеризована система лазерної обробки оптичних матеріалів»

Виконала: студентка 4 курсу, групи KOIC-216
спеціальності 152 – Метрологія та
інформаційно-вимірювальна техніка,
ОП «Комп'ютеризовані оптико-інформаційні
системи»

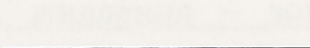
 Кравченко А.О.

Керівник: к.т.н., доц., доцент кафедри
БМІОЕС

 Тужанський С.Є.

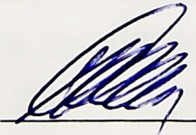
«10» червня 2025 р.

Рецензент: к.т.н., ст.викл. каф. ІРТС

 Притула М.О.

«16» червня 2025 р.

Допущено до захисту

Зав. кафедри БМІОЕС  Л.Г. Коваль

«17» червня 2025 р.

Вінницький національний технічний університет

Факультет інформаційних електронних систем

Кафедра біомедичної інженерії та оптико-електронних систем

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

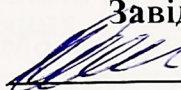
Галузь знань 15 - автоматизація та приладобудування

Спеціальність 152 - метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

Освітньо-професійна програма – комп'ютеризовані оптико-інформаційні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри БМІОЕС

 **Л.Г. Коваль**

«21» березня 2025 року

З А В Д А Н Н Я

НА БАКАЛАВРСЬКУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Кравченко Анастасії Олександрівні

1. Тема роботи Комп'ютеризована система лазерної обробки оптичних матеріалів

Керівник роботи Тужанський Станіслав Євгенович, к.т.н., доцент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ВНТУ від “20” березня 2025 року № 97

2. Термін подання студентом роботи 30 травня 2025 р.

3. Технічні вимоги і склад системи – комп'ютеризована система поверхневої обробки матеріалів, склад системи – технологічний Nd:YAG лазер, робоча довжина хвилі 1064 нм, потужність 50Вт; комп'ютерний блок керування і автоматизованого контролю; оптичні елементи; фотоприймальний сенсор, блок температурного контролю, блок живлення – зовнішнє джерело постійної напруги.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; технічне обґрунтування доцільності розробки; аналіз та класифікація методів та засобів лазерної обробки матеріалів, розробка методу лазерної поверхневої обробки оптичних зразків, структурної, оптичних і електричних схем пристрою, моделювання і аналіз параметрів лазерного випромінювача та фотоприймача, аналіз роботи системи, висновки; список використаних джерел; додатки.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

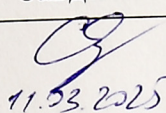
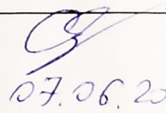
5.1 Схеми випромінювача технологічного лазера

5.2 Схема структурна комп'ютеризованої системи лазерної обробки оптичних матеріалів

5.3 Схема оптична фокусувального блоку випромінювача

5.4 Схема блоку живлення лазера

6. Консультанти розділів роботи

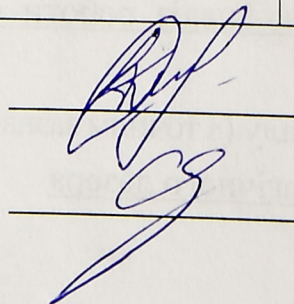
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Спеціальна частина	Тужанський С.Є. к.т.н., доцент кафедри БМІОЕС	 11.03.2025	 07.06.2025

7. Дата видачі завдання «11» березня 2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Назва та зміст етапу	Термін виконання		Примітка
	початок	закінчення	
Вибір, узгодження та затвердження теми БКР	11.03.2025	19.03.2025	Виконано
Аналіз літературних джерел. Попередня розробка основних розділів	20.03.2025	09.04.2025	Виконано
Пошук методів і засобів вирішення поставленої задачі	10.04.2025	01.05.2025	Виконано
Розробка методу і структури системи	02.05.2025	17.05.2025	Виконано
Розробка схем і апаратних модулів керування системи	18.05.2025	24.05.2025	Виконано
Експериментальні або модельні дослідження	24.05.2025	31.05.2025	Виконано
Оформлення пояснювальної записки та графічної частини	01.06.2025	07.06.2025	Виконано
Нормоконтроль	05.06.2025	09.06.2025	Виконано
Попередній захист БКР, доопрацювання, рецензування БКР	11.06.2025	16.06.2025	Виконано
Захист БКР ЕК	19.06.2025	20.06.2025	

Студентка



А.В. Кравченко

Керівник роботи

С.Є. Тужанський

АНОТАЦІЯ

Бакалаврська кваліфікаційна робота складається з 63 сторінок формату А4, на яких є 4 таблиці, список використаних джерел містить 34 найменувань.

Бакалаврська кваліфікаційна робота присвячена розробці комп'ютеризованої системи на основі технологічного лазера для поверхневої обробки оптичних та інших матеріалів, в якій відбувається візуальний контроль робочої зони зразка на основі вимірювання температурних розподілів поверхні опромінення.

У роботі проведено аналіз методів і засобів лазерної обробки оптичних матеріалів, розроблено структурну схему комп'ютеризованої системи поверхневої обробки матеріалів на основі Nd:YAG лазера, схему випромінювача та оптичної системи фокусування лазерного випромінювання. Також наведено розрахунок і моделювання основних процесів взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами, розроблено схеми блоку живлення лазера і температурного контролю системи.

Ключові слова: технологічний лазер, поверхнева обробка, температурний контроль, оптичні матеріали.

ABSTRACT

Bachelor's thesis: 63 pages, 4 tables, 34 bibliographies. sources.

The bachelor's qualification work is devoted to the development of a computerized system based on a technological laser for surface treatment of optical and other materials, in which the working area of the sample is visually controlled based on the measurement of temperature distributions of the irradiated surface.

The work analyzes the methods and means of laser processing of optical materials, develops a structural diagram of a computerized system for surface treatment of materials based on an Nd:YAG laser, a diagram of an emitter and an optical system for focusing laser radiation. Also, the calculation and modeling of the main processes of interaction of laser radiation with materials are provided, and schemes of a laser power supply and temperature control system are developed.

Keywords: technological laser, surface treatment, temperature control, optical materials.

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	7
1.1 Методи і засоби технологічної обробки оптичних матеріалів	7
1.2 Порівняльний аналіз комп'ютеризованих систем лазерної обробки.....	11
1.3 Методи контролю та оцінки результатів лазерної обробки.....	13
1.4 Висновки.....	18
2 МЕТОДИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ В КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	19
2.1 Вибір методу обробки оптичних матеріалів.....	19
2.2 Модельні розрахунки для аналізу умов обробки системи	20
2.3 Моделі і методи обробки оптичних матеріалів	25
2.4 Методи керування та оптимізації в комп'ютеризованих системах.....	29
2.5 Висновки.....	31
3 РОЗРОБКА КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	33
3.1 Компоненти та архітектура комп'ютеризованої системи лазерної обробки.....	33
3.2 Конструкція і опис роботи комп'ютеризованої системи лазерної обробки	42
3.3 Висновки.....	48
ВИСНОВКИ.....	50
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	51
ДОДАТКИ.....	55
Додаток А (обов'язковий) Протокол перевірки кваліфікаційної роботи.....	56
Додаток Б (обов'язковий) Графічна частина.....	57

ВСТУП

Розвиток сучасного виробництва важко уявити без технологій лазерної обробки. Технологічні комплекси на основі лазерів дозволяють виконувати значну кількість операцій обробки – від термозміцнення поверхонь до різання металевих деталей значної товщини. Обробка матеріалів за допомогою лазерного обладнання - це одна з передових технологій, яка використовується нарівні з традиційними фізико-хімічними методами обробки. Принципи лазерної обробки відносяться до немеханічних способів і ґрунтуються на впливі температур на поверхню металу.

Лазерна обробка оптичних матеріалів є одним з методів поверхневої обробки. Лазерний промінь формується джерелом випромінювання та спрямовується через дзеркало у оптичну скануючу систему, де за допомогою лінзи він фокусується: при цьому значно зменшується діаметр променя та збільшується його потужність. Сфокусований лазерний промінь потрапляє на матеріал та розплавляє його.

Якість і точність обробки сучасними лазерними технологічними установками зростає за рахунок удосконалення технологій та програмного забезпечення для автоматизованого керування. Разом з тим існуючі системи потребують більшої універсальності та гнучкості у роботі, а також удосконаленого оптичного контролю за температурою у робочій зоні обробки матеріалів, що зумовлює актуальність тематики дослідження.

Мета й завдання дослідження

Мета роботи – розширення функціональних можливостей системи лазерної обробки оптичних матеріалів, а також підвищення гнучкості технологічних процесів за рахунок температурного контролю робочої зони опромінення.

Для виконання поставленої мети потрібно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз огляд методів та засобів лазерної обробки оптичних матеріалів, основних типів лазерів для технологічної обробки.

2. Здійснити аналіз методів контролю процесів обробки матеріалів з обґрунтуванням вибору.

3. На основі фундаментальних законів квантової та оптичної електроніки розрахувати характеристики системи та промодельовати процеси взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами, енергетичні характеристики випромінювача, параметри оптичної та сканувальної системи для керування випромінюванням.

4. Обґрунтувати вибір елементної бази складових системи лазерної обробки оптичних матеріалів.

5. Розробити структурну схему комп'ютеризованої системи лазерної обробки оптичних матеріалів, електричні та оптичні схеми випромінювача, оптичної системи фокусування, блоку контролю. Здійснити опис її роботи.

Об'єкт дослідження

Процеси взаємодії лазерного випромінювання із матеріалами

Предмет дослідження

Методи, моделі та апаратно-програмні засоби лазерної обробки оптичних матеріалів, а також принципи побудови та функціонування автоматизованих систем на їхній основі

1 АНАЛІЗ МЕТОДІВ, ЗАСОБІВ І ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОЇ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

1.1 Методи і засоби технологічної обробки оптичних матеріалів

Оптичні матеріали – це середовища, здатні для передавання, заломлення, відбивання або поглинання світла у оптичних діапазонах від ультрафіолетового, близько 100 нм, до інфрачервоного, близько 10000 нм [2]. Кожен з цих матеріалів має свої особливості, завдяки яким він має більшу актуальність у використанні в певній сфері використання. Матеріали поділяються на різні групи в залежності від своїх властивостей таких як [3]:

1. Оптичні властивості, до яких відносяться :

прозорі - можуть пропускати світло з як можна меншими втратами, такі як кварц, скло, флюорит;

поглинаючі – мають здатність пропускати лише певні довжини хвиль, наприклад ультрафіолетового діапазону;

відбиваючі – дзеркальні матеріали, що можуть заломлювати світло та відзеркалювати його;

дифракційні – можуть формувати світло через мікроструктури.

2. Фізичні :

неорганічні, як скло або кристали;

органічні, до яких відносяться полімери, зокрема полікарбонат, та рідкі кристали;

комбіновані, з яких виготвляють метаматеріали та фотонні кристали.

3. За функціональністю:

пасивні – для передачі або зміна напрямку світла, або інтенсивності, такі як лінзи, вікна;

активні – зміна стану під дією тепло-електричних чинників.

Фізичні процеси взаємодії лазерного випромінювання з оптичними матеріалами включають:

- поглинання, відбиття, пропускання світла;

- термічні ефекти (плавлення, випаровування, абляція);
- нелінійні оптичні ефекти (багатофотонна іонізація, генерація гармонік);
- механізм руйнування матеріалу лазерним випромінюванням;
- вплив довжини хвилі, тривалості імпульсу, потужності та частоти повторення імпульсів на результат обробки.

Найчастіше для обробки оптичних матеріалів використовують саме лазерні прилади. Це обумовлено тим що лазерні верстати мають достатньо високу точність, та вони не пошкоджують матеріал при обробці, також їх достатньо легко інтегрувати у автоматизоване виробництво [4].

Лазери класифікують в залежності від типу активного середовища, режиму роботи та довжини хвилі, що також не менш важливо при обробці матеріалів [5].

За типом активного середовища розділяють твердотільні, газові, рідинні, напівпровідникові та волоконні. Наведемо їх характеристики у таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння типів лазерів за активним середовищем

Тип лазера	Активне середовище	Довжина хвилі	Переваги	Недоліки
Твердотільний	Кристали, скло	1064 нм	Висока потужність, стабільність	Велике тепловиділення
Газовий	Газ	632 нм	Якість променя, стабільність спектру	Габарити, висока напруга
Рідинний	Органічні барвники у розчині	400-800 нм	Широкий спектр налаштування	Токсичність, складне обслуговування
Напівпровідниковий	PN-перехід у чипі	650-1550 нм	Економічність, масовість	Омежена потужність, потреба у охолодженні
Волоконний	Оптичне волокно з домішками	1550 нм	Висока ефективність, гнучкість, масштабування	Вартість, складність інтеграції

Основним складовим компонентом комп'ютеризованої системи, що розробляється, є твердотільний технологічний Nd:YAG лазер потужністю у десятки Вт з робочою довжиною хвилі 1064 нм, який підходить для мікрообробки з відповідною точністю та генерує випромінювання, що дає змогу отримати діаметр лазерного променя у фокусі до кількох мікрон [6].

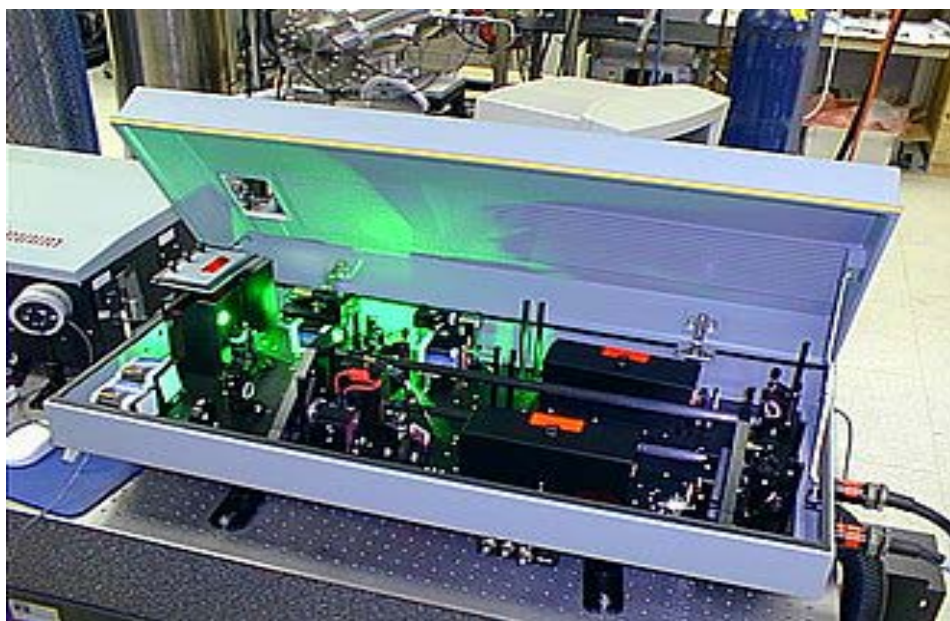


Рисунок 1.1. Nd: YAG лазер (загальний вигляд, показано генерування другої гармоніки з довжиною хвилі 532 нм)

Технології лазерної обробки достатньо розвинуті в наші часи й можуть виконувати найскладніші функції, які б не змогла виконати на такому рівні жодна людина. Найбільш поширені методи з них [8]:

1. Метод лазерного різання
2. Метод лазерного гравіювання
3. Метод лазерного шліфування та полірування
4. Метод лазерного зварювання
5. Метод лазерного травлення
6. Метод лазерної абляції
7. Метод лазерного легування поверхні
8. Метод лазерної інтерференційної літографії
9. Метод лазерного сканування
10. Метод лазерної обробки у надкоротких імпульсах

Таблиця 1.2. Методи лазерної обробки оптичних матеріалів

Метод/технологія	Призначення	Принцип дії	Типи лазерів	Приклади застосування
Лазерне різання	Точне відділення частин матеріалу	Фокусований лазер плавить / випаровує матеріал	CO ₂ , Nd:YAG, волоконні	Різання оптичних лінз, скляних пластин, світловодів
Лазерне гравіювання	Нанесення маркувань, етикеток або структур поверхні	Локальне випаровування або зміна структури матеріалу	Nd:YVO, CO ₂ , UV	Маркування лінз, антивандальні позначки на оптичних приладах
Лазерне шліфування та полірування	Удосконалення оптичної якості поверхні	Нагрів матеріалу до температури розм'якшення з подальшим вирівнюванням	CO ₂ , ексимерні лазери	Полірування лінз, формування високоякісних дзеркальних поверхонь
Лазерне зварювання	З'єднання частин оптичних матеріалів	Спрямоване локальне нагрівання з подальшим охолодженням і з'єднанням	Nd:YAG, волоконні	Зварювання корпусів для оптичних елементів, світловодів
Лазерне травлення / мікроструктурування	Створення мікроструктур на поверхні	Поглинання імпульсного лазера з руйнуванням на мікрорівні	Фемтосекундні, UV	Створення дифракційних оптичних елементів, оптичних мікросхем
Лазерна абляція	Видалення тонких шарів матеріалу	Імпульсне випаровування речовини без термічного впливу	Фемтосекундні, ексимерні	Очищення поверхонь, тонке мікрооброблення оптичних покриттів
Лазерне легування поверхні	Модифікація властивостей поверхні (твердість, заломлення тощо)	Лазер розплавляє тонкий шар і змішує з легуючими елементами	Nd:YAG, CO ₂	Поліпшення оптичних і механічних властивостей поверхні
Лазерна інтерференційна літографія	Створення періодичних наноструктур	Інтерференція лазерних пучків створює шаблон на фоторезисті	UV, ексимерні	Виготовлення ґраток, фотонних кристалів
Лазерне сканування / стереолітографія	Виготовлення 3D-структур або елементів оптики з полімерів	Послідовне затвердіння фотополімеру лазером	UV, сині лазери	Виготовлення експериментальних лінз, адаптивної оптики
Лазерна обробка у надкоротких імпульсах	Точна внутрішня обробка прозорих матеріалів (включно з 3D мікроструктурами)	Лазер проникає в матеріал і модифікує його без пошкодження зовнішніх шарів	Фемтосекундні	Створення тривимірних мікрооб'єктів у склі, написів у товщі матеріалу

1.2. Порівняльний аналіз комп'ютеризованих систем лазерної обробки

Комп'ютерні системи використовуються для контролю лазерними установками без похибок, які могли б виникнути через людський фактор та дозволяє ефективно використати наявні матеріали. Через це вони активно використовуються в промисловості, науці та медицині.

На сучасних ринку лазерних технологічних систем представлено сотні різних виробників з великою номенклатурою. Розглянемо деякі з них:

Coherent ExactCut – у цій системі використовується імпульсний лазер потужністю 150 - 300 Вт, який на піку може мати потужність до 1.5 – 3.0 кВт. Система сконструйована з граніту що забезпечує стабільність та мінімальні вібрації. Процює на програмному забезпеченні CAD/CAM, що має достатньо інтуїтивний інтерфейс, дозволяючи швидко налаштувати систему та змінити потрібні параметри. Також система має можливість підключення до MES-систем та роботизованих маніпуляторів з конвеєрам [7].

Ekspla FemtoLux 30 – завдяки своєму ультракороткоімпульсному лазеру що розроботаний литовською компанією Експра ця система допомагає проводити надточні мікрообробки. Гнучкий до налаштувань. Використовує хвилі такої довжини, як 1030 нм(інфрачервоний), 515 нм(зелений), 343 нм(ультрафіолетовий). Середня потужність може різнитися для різних довжин від 6 Вт для зеленого випромінювання до 30 Вт для інфрачервоного. Має можливість контролю через USB-підключення, LAN, RS232, також підтримує REST API, що дозволяє інтегрувати систему з такими платформами як Windows та Linux [12].

IPG Photonics YLS – високопродуктивна платформа, яка працює на волоконних лазера для точності різання, зварювання та термічної обробки широкого спектру матеріалів. Використовує довжину хвилі в 1080 нм. Потужність може різнитися від 1 до 125 кВт. Керується цифровими та аналоговими інтерфейсами через модулі Ethernet, Profibus, DeviceNet [9].

Coherent UV Blade – система, що призначена для процесу лазерного відшаровування, використовується для виготовлення гнучких дисплеїв. Для роботи використовується лазер з довжиною хвилі 308 нм [10].

Polystar PL-200C – система для лазерного очищення поверхонь від іржі, фарми та інших забруднень. Використовує оптоволоконний лазер довжиною від 1064 до 1080 нм [11].

Таблиця 1.3. Порівняльна таблиця існуючих комп'ютеризованих систем

Система	Тип лазера	Довжина хвилі	Потужність	Призначення	Особливості
Coherent ExactCut	Волоконний	1030–1064 нм	До 3 кВт	Прецизійне різання скла, кераміки, сапфіру	Висока точність, інтеграція з CAD/AI, автоматизація
Ekspla FemtoLux 30	Ультракоротко імпульсний (фемтосекундний)	1030 нм	До 30 Вт	Мікрообробка скла, сапфіру, полімерів	Режими від фемтосекунд до наносекунд, охолодження без води
IPG Photonics YLS	Волоконний	1070 нм	До 20 кВт	Різання, зварювання, гравіювання	Висока ефективність, стабільність, тривалий термін служби
Coherent UV Blade	Ультрафіолетовий (UV)	355 нм	До 10 Вт	Мікрообробка прозорих матеріалів	Висока точність, мінімальний тепловий вплив
Polystar PL-200C	Волоконний імпульсний	1064 нм	До 200 Вт	Очищення поверхонь, підготовка до обробки	Безконтактне очищення, збереження структури матеріал

1.3 Методи контролю та оцінки результатів лазерної обробки

Основні методи контролю результатів лазерної обробки наведено у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 Методи контролю лазерної обробки матеріалів

Категорія	Метод	Опис та застосування
Візуальні	Мікроскопія (оптична/електронна)	Оцінка дефектів, мікротріщин, точності краю, структури поверхні
Оптичні	Інтерферометрія	Вимірювання форми, шорсткості, деформацій поверхні з точністю до нанометрів
	Лазерна профілометрія	Створення 3D-моделі поверхні після обробки
Механічні	Контактні профілометри	Вимірювання глибини/ширини канавок, точності обробки
Метролого-аналітичні	Координатно-вимірювальні машини (КВМ)	Визначення просторових відхилень, співвісності, точності об'єкта
Фізичні	Термічний контроль (ІЧ-камери)	Виявлення зон перегріву/оплавлення в режимі реального часу
Хімічні/спектральні	Раман-спектроскопія, EDX	Аналіз змін у структурі матеріалу, виявлення залишкових фаз, домішок
Математичні	Алгоритмічна оцінка (CAD-порівняння)	Порівняння фактичної моделі з проектною (CAD-to-reality)

Оптична мікроскопія базується на проходженні світла через систему лінз та відбивається або проходить через зразок, формуючи збільшене зображення.

Інтерферометрія базується на взаємодії лазерного випромінювання, що поділяється на два пучки – один відбивається від зразка, інший від еталона, завдяки чому утворюється інтерференційна картина, яка відображає усю інформацію про форму, а саме відхилення від еталону та деформацію. Має високу точність до нанометрів. Допомогає у контролі лінз, дзеркал та поверхонь після мікрофібри [12].

Лазерна профілометрія – метод заснований на скануванні поверхні вузьким лазерним променем, що будує 3D-карту профілю, завдяки вимірюванням відбитого світла. Дозволяє виміряти глибину, ширину, кут нахилу та шорсткість[13].

Контактний профілометричний метод контролю сканування поверхні зразка впродовж певної лінії, вимірюючи мікронерівності, завдяки алмазному щупу що переміщується по поверхні, при виявленні нерівностей посиляється електричний сигнал що оцифровується і відібражається на профілі поверхні. Підходить для полімерів [14].

Метод координатно-вимірювальних машин дозволяє в тривимірному просторі визначати геометричні характеристики об'єктів шляхом зчитування, вимірювальними головками КВМ, що переміщується по трьох координатах. При дотику реєструється точна координата. Має точність до 0.001 мм. Але має ряд недоліків, бо потребує кваліфікованого персоналу, значних коштів, через велику вартість, обмеження при вимірюванні прозорих, та дзеркальних поверхонь [15].

Метод термічного контролю – працює завдяки фіксуванню тепловізорами інфрачервоного випромінювання під час лазерної обробки за рахунок нагріву матеріалу, що випромінюється об'єктом і перетворюють його на видиме зображення температурного розподілу. Після чого формується аналіз динаміки процесу на основі даних максимальних температур, градієнтів та зон теплового впливу[16].

Раман-спектроскопія, EDX – це оптичний метод аналізу речовини, що заснований на непружному розсіюванні світла, який дозволяє виявити молекулярний та кристалічний склад, хімічні зв'язки, структурні зміни на поверхні після обробки [17].

Метод алгоритмічної оцінки (CAD-порівняння) полягає у порівнянні фактично виготовленого об'єкту з його теоритичною CAD-моделлю. Порівняння виконується автоматизовано за допомогою спеціального програмногозабезпечення. Спочатку сканується обробленої деталі, після чого

скановані данні накладаються на CAD-модель, та обчислюються відхилення у розмірах, формах, кутах[18].

Сучасними досягненнями в лазерній обробці оптичних матеріалів стало використання фемтосекундних лазерів для прецизійної обробки (до прикладу – створення 3D мікроструктур всередині прозорих матеріалів без пошкодження зовнішніх шарів, технологія так званої "холодної" абляції, застосування лазерів в обробці та виробництві мікро-, нано- оптики та лазерна модифікація поверхонь оптичних матеріалів для зміни показника заломлення або твердості. Має точність від 10 нм до 1 мкм.

Для контролю температури при лазерному опроміненні в процесі обробки перспективними вважають термоелектричні та фотоелектричні датчики температури. Складність контактних методів зумовила поширення оптоелектронних приладів на основі безконтактних датчиків типу інфрачервоних термометрів (пірометрів). Основним діапазоном для дистанційного вимірювання температури в таких приладів є інфрачервоний діапазон довжин хвиль 0,76-20 мкм. Пірометр призначається для вимірювання температури практично будь-якого об'єкта безконтактним методом на відстані за їх власним тепловим випромінювання [10].

В основі роботи пірометра лежить принцип сприйняття теплової енергії електромагнітного випромінювання (інфрачервоного світла), що випромінюються тілом, причому спектральна чутливість інтенсивності такого випромінювання має пряму залежність від температури об'єкта.

За принципом роботи розділяють односпектральні і мультиспектральні пірометри. Останні приймають випромінювання у двох і більше спектральних діапазонах, температура об'єкта встановлюється шляхом зіставлення потужностей в різних діапазонах і характеризуються максимальною точністю у визначенні температури об'єкта.

Потік випромінювання від об'єкта сприймається оптичною системою приймача інфрачервоного випромінювання і направляється безпосередньо (пірометр прямого наведення) або за допомогою оптичного волокна (у випадку

волоконно-оптичної конструкції пірометра) на датчик випромінювання. Датчик випромінювання перетворює енергію випромінювання в електричний сигнал. Тип датчика формує спектральну характеристика пірометра. Наприклад, малогабаритний датчик оптичного випромінювання МГ-33-01 працює в діапазоні від 2 до 20 мкм. Його спектральна характеристика приведена на рис.1.2

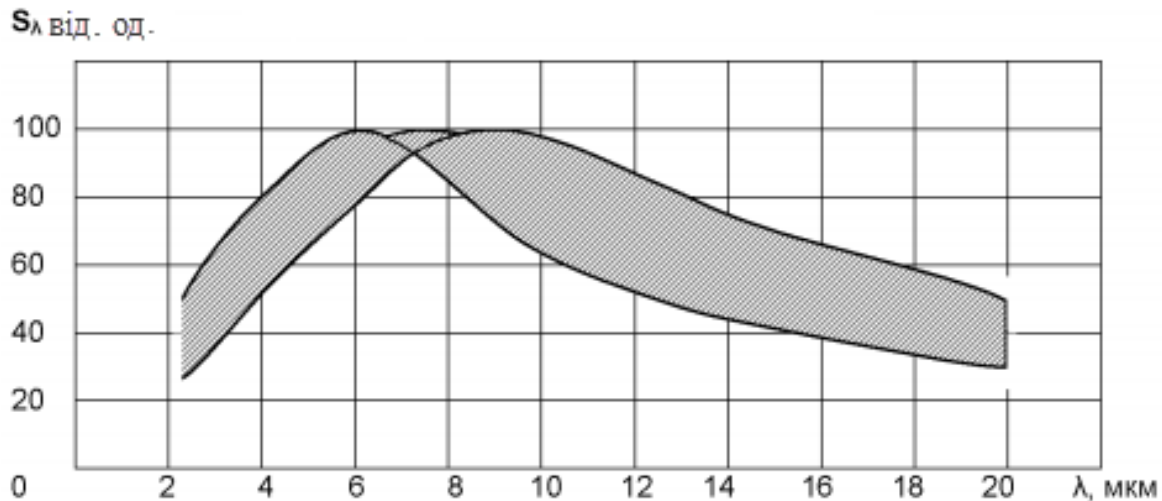


Рисунок 1.2 Спектральна характеристика датчика МГ-33-01

Сигнал з датчика посилюється і перетворюється в цифровий код. Далі цифровий код надходить в блок цифрової обробки, який виконує наступні функції:

- обчислення температури об'єкта;
- формування вихідних сигналів пірометра;
- організацію зв'язку з ПК.

Пірометри є незамінними елементами систем контролю і управління в цілому ряді застосувань у галузі метрології та інформаційно-вимірювальної техніки, зокрема для автоматизації процесів у різних галузях промислового виробництва (металургія, машинобудування, електронна техніка, хімічна промисловість). Їм немає альтернативи при вимірюванні температури рухомих об'єктів на виробництві, у важкодоступних або небезпечних зонах (підстанції високої напруги) об'єктів.

За температурним діапазоном пірометри поділяються на низько- та високотемпературні пристрої. Для вирішення задач бакалаврської дипломної роботи підходять низькотемпературні переносні (компактні) пірометри.

Конструктивно, з урахуванням оптичного тракту вимірювання такі пірометри бувають:

- прямого лінійного оптичного наведення;
- оптоволоконні пірометри.

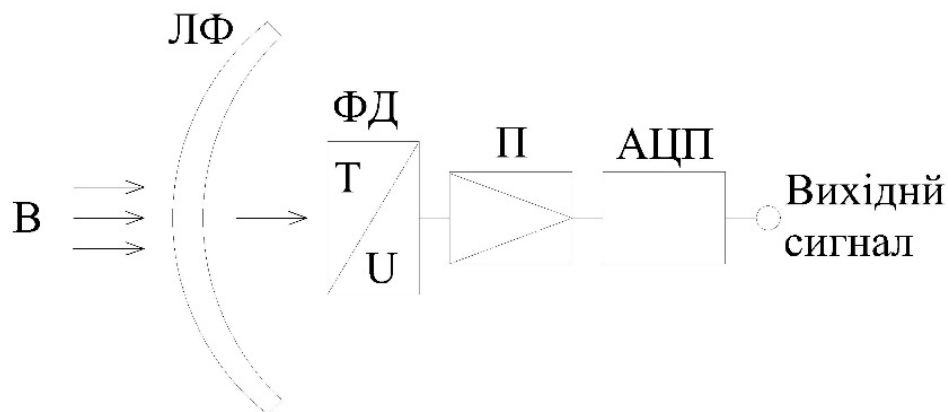


Рисунок 1.3 Структурна схема пірометра прямого наведення:

В - потік випромінювання; ЛФ - лінза Френеля; ФД - фоточутливий датчик; П - підсилювач; АЦП - аналого-цифровий перетворювач

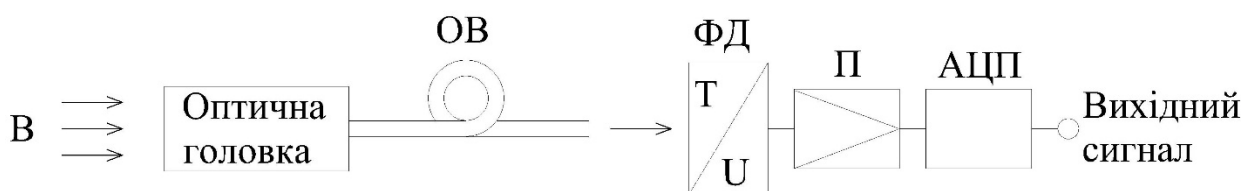


Рисунок 1.4 Структурна схема оптоволоконного пірометра:

В - потік випромінювання; ОВ - оптичне волокно; ФД - фоточутливий датчик; П - підсилювач; АЦП - аналого-цифровий перетворювач.

1.4 Висновки до розділу 1

У рамках першого розділу бакалаврської кваліфікаційної роботи проведено ґрунтовний аналіз предметної області, що є ключовим для розуміння та подальшої розробки комп'ютеризованої системи лазерної обробки оптичних матеріалів. Визначено, що оптичні матеріали, які використовуються у широкому спектрі галузей – від телекомунікацій та медицини до промисловості та військових цілей, вимагають високоточної обробки, яку ефективно забезпечують лазерні технології. Детально розглянуто фізичні основи взаємодії лазерного випромінювання з оптичними матеріалами, включаючи поглинання, відбиття, пропускання світла, термічні ефекти та механізми руйнування матеріалу. Проаналізовано різноманітні методи лазерної обробки, такі як різання, гравіювання, шліфування, полірування, зварювання, травлення, абляція, легування, інтерференційна літографія, сканування та обробка надкороткими імпульсами. Для кожного методу визначено його призначення, принцип дії, типи лазерів та приклади застосування, що підкреслює універсальність лазерних технологій у сфері обробки оптичних матеріалів.

Проведений порівняльний аналіз типів лазерів за активним середовищем (твердотільні, газові, рідинні, напівпровідникові та волоконні) дозволив обґрунтувати вибір твердотільного лазера (наприклад, Nd:YAG) з довжиною хвилі до 1064 нм як найбільш актуального для мікрообробки з помірною точністю, завдяки його здатності формувати високоточний малий діаметр лазерного променя до кількох мікронів. Це закладає теоретичну основу для створення гнучкої комп'ютеризованої системи лазерної обробки оптичних матеріалів, що відповідатиме сучасним вимогам промисловості до точності та ефективності.

2 МЕТОДИ ТА МОДЕЛЮВАННЯ В КОМП'ЮТЕРИЗОВАНИХ СИСТЕМАХ ОБРОБКИ ОПТИЧНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1. Вибір методу обробки оптичних матеріалів

Лазерне шліфування – це сучасний високоточний метод обробки, який використовує сфокусований лазерний промінь для видалення дуже тонких шарів металу з поверхні оптичного матеріалу (лінзи, призми, фотонні кристали). Цей процес насамперед дозволяє досягти гладкої поверхні з мінімальними пошкодженнями, що є критично важливим для оптичних приладів [12].

Традиційні методи шліфування оптичних матеріалів хоч і добре розроблені, але часто зіштовхуються з обмеженнями щодо точності та можливості обробки складних форм оптичних матеріалів. Такі матеріали як оптичні лінзи, призми та фотонні кристали потребують для обробки високої точності поверхні та мінімального пошкодження поверхні. В наш час лазерна обробка стала перспективною альтернативою, яка пропонує високоточний та контрольований безконтактний метод обробки.

Використання твердотільних лазерів, а в особливості імпульсних (-піко або фемтосекундних) у поєднанні з комп'ютеризованою системою відкриває нові можливості для шліфування оптичних поверхонь шляхом прецизійної абляції – видаленням матеріалу з поверхні внаслідок інтенсивного поглинання лазерного випромінювання. У твердотільних лазерах в якості активного середовища використовуються штучно вирощені кристали (наприклад, рубін, гранат) або скло з додаванням активованих іонів (наприклад, неодим, ітербій), що формуються у вигляді стрижнів або пластин. Збудження активної речовини в таких лазерах здійснюється за допомогою оптичної накачки, як правило, від газорозрядних ламп [13].

Переважає більшість твердотільних лазерів функціонує в імпульсному режимі. При цьому вихідна енергія може варіюватися від десятих часток джоуля до тисяч джоулів і вище. Потужність випромінювання досягає значень від міліват до гігават при генерації гігантських імпульсів. Незважаючи на високі

енергетичні показники, коефіцієнт корисної дії (ККД) твердотільних лазерів залишається відносно низьким, складаючи лише кілька відсотків.

Тривалість імпульсів у твердотільних лазерах може коливатися від десятих часток пікосекунди (10–12 с) і більше. Спектральний діапазон генерації випромінювання охоплює переважно інфрачервону та видиму області. Важливою характеристикою є також розбіжність променя, яка для твердотільних лазерів є порівняно значною, перебуваючи в діапазоні 20'–30'.

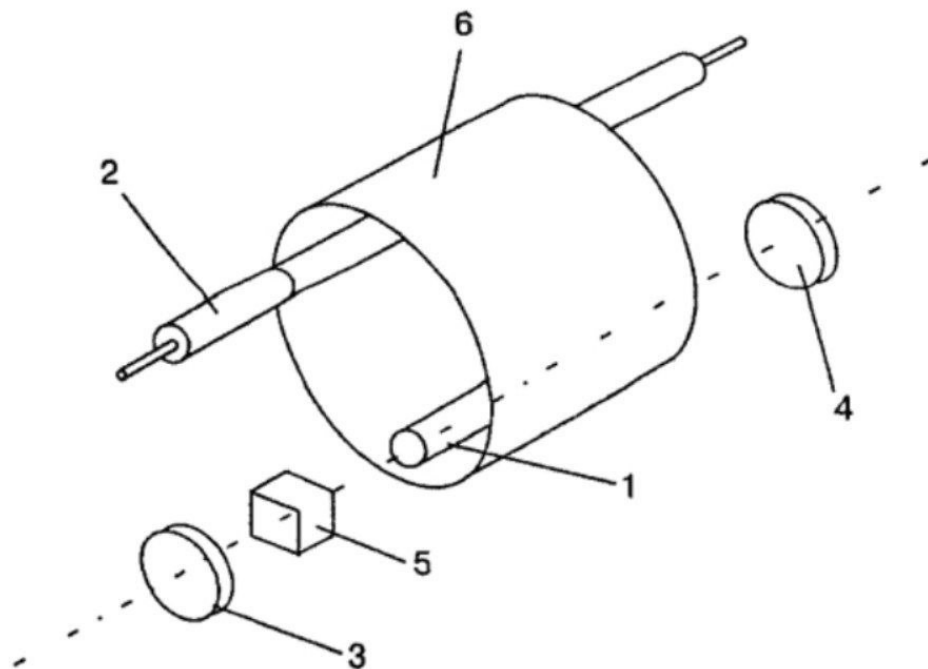


Рисунок 2.1. Твердотільний лазер (одна з конструкцій)

1 – активний лазерний стрижень, 2 – лампа накачування, 3 – дзеркало, 4 – оптичний резонатор, 5 – оптичний затвор, 6 – замкнутий рефлектор еліптичної форми, заповнений охолоджувальною рідиною

2.2. Модельні розрахунки для аналізу умов обробки системи

Для подальшої роботи лазерної системи з оптичними матеріалами та обробки проведемо ряд розрахунків.

1. Щільність потужності лазера (інтенсивність)

Щільність потужності I визначає, скільки потужності зосереджено на одиниці площі оброблюваного матеріалу [18].

$$I = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

де P – середня потужність лазера (Вт),

A – площа плями лазера (м^2),

Середня потужність лазера $P = 10$ Вт,

Діаметр лазерної плями $d = 50$ мкм $= 50 \times 10^{-6}$ м,

Тоді радіус плями $r = d/2 = 25 \times 10^{-6}$ м.

Площа плями

$$A = \pi r^2 = \pi (25 \times 10^{-6})^2 \approx 1,96 \times 10^{-9} \text{ м}^2$$

$$I = \frac{10 \text{ Вт}}{1,96 \times 10^{-9} \text{ м}^2} \approx 5,1 \times 10^9 \text{ Вт/м}^2 = 5,1 \times 10^5 \text{ Вт/см}^2$$

Щільність енергії (флюенс) F є важливою величиною для імпульсних лазерів і показує енергію, яка припадає на одиницю площі за один імпульс.

$$F = \frac{E}{A} \quad (2.2)$$

Де E – енергія одного імпульсу (Дж),

A – площа плями лазера (м^2)

Енергію одного імпульсу можна знайти, якщо відома середня потужність P та частота повторення імпульсів f :

$$E = \frac{P}{f} \quad (2.3)$$

Частота повторення імпульсів $f = 100$ кГц $= 10^5$ Гц. Середня потужність $P = 10$ Вт

Енергія одного імпульсу $E = \frac{10 \text{ Вт}}{10^5 \text{ Гц}} = 10^{-4}$ Дж

Використовуючи площу плями $A \approx 1,96 \times 10^{-9} \text{ м}^2$ отримаємо

$$F = \frac{10^{-4} \text{ Дж}}{1,96 \times 10^{-9} \text{ м}^2} \approx 5,1 \times 10^4 \text{ Дж/м}^2 = 5,1 \text{ Дж/см}^2$$

Глибина проникнення δ залежить від коефіцієнта поглинання матеріалу α . Для багатьох оптичних матеріалів при довжинах хвиль, де вони прозорі, поглинання може бути низьким. Але, при високоінтенсивному лазерному впливі можуть виникати нелінійні ефекти, такі як багатофотонне поглинання, що призводить до ефективного поглинання навіть у прозорих матеріалах.

Для лінійного поглинання використовуємо формулу [15]

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}, \quad (2.4)$$

де $I(z)$ – інтенсивність на глибині z ,

I_0 – початкова інтенсивність,

α – коефіцієнт поглинання (м^{-1})

Глибина проникнення, де інтенсивність зменшується в e разів, становить [17]

$$\delta = 1/\alpha. \quad (2.5)$$

Для оптичних матеріалів, особливо при обробці, де відбувається абляція, більш релевантною є оптична глибина проникнення, пов'язана з порогом абляції та механізмами нелінійного поглинання. У випадку лазерного шліфування важливою є не лінійна глибина проникнення, а глибина абляції, яка залежить від флюенсу лазера і порогу абляції матеріалу.

Швидкість абляції v_{abl} показує, наскільки швидко видаляється матеріал. Для кожного імпульсу видаляється певний шар матеріалу [18]:

$$h = \frac{1}{\alpha_{eff}} \ln \frac{F}{F_{th}} \quad (2.6)$$

де h – глибина абляції за один імпульс (м)

α_{eff} – ефективний коефіцієнт поглинання при абляції (м^{-1})

F – флюенс лазера

F_{th} – поріг лазерного руйнування (флюенс порогу абляції)

Швидкість абляції при скануванні (якщо лазер працює в імпульсному режимі)

$$v_{scan} = h \times f \quad (2.7)$$

Де f – частота повторення імпульсів (Гц)

Для певного оптичного матеріалу

$$F_{th} = 0,5 \text{ Дж/см}^2 = 5000 \text{ Дж/м}^2, \text{ а } \alpha_{eff} = 10^5 \text{ м}^{-1}$$

Використаємо розрахований раніше флюенс

$$F = 5,1 \times 10^4 \text{ Дж/м}^2$$

Глибина абляції за один імпульс :

$$h = \frac{1}{10^5} \ln \left(\frac{5,1 \times 10^4}{5000} \right) = 10^{-5} \ln(10,2) \approx 2,32 \times 10^{-5} \text{ м}$$

Швидкість абляції при частоті $f = 10^5$ Гц :

$$v_{abl} = h \times f = (2,32 \times 10^{-5} \text{ м}) \times (10^5 \text{ Гц}) = 2,32 \text{ м/с}$$

Це швидкість “виїдання” матеріалу вглиб при постійному впливі в одній точці, або швидкість просування лазерної плями для забезпечення абляції.

Об’єм видаленого матеріалу за один імпульс

$$V_{imp} = A \times h \quad (2.8)$$

де A - площа плями лазера (м^2),

h – глибина абляції за один імпульс (м).

Використовуючи раніше розраховані значення

$A \approx 1,96 \times 10^{-9} \text{ м}^2$ та $h \approx 2,32 \times 10^{-5} \text{ м}$ отримаємо :

$$V_{imp} = (1,96 \times 10^{-9} \text{ м}^2) \times (2,32 \times 10^{-5}) \approx 4,55 \times 10^{-14} \text{ м}^3$$

Швидкість сканування v_{scan} визначає наскільки швидко лазерна пляма рухається по поверхні матеріалу. Для ефективності абляції важливо забезпечити достатнє перекриття імпульсів. Перекриття імпульсів S_x (вздовж напрямку сканування) вираховується за формулою :

$$S_x = (1 - \frac{v_{scan}}{d \times f}) \times 100\% \quad (2.9)$$

де d – діаметр лазерної плями (м),

f – частота повторення імпульсів (Гц)

Для досягнення бажаної глибини обробки та якості поверхні зазвичай потрібно значне перекриття (50-90%)

Звідси можна вивести швидкість сканування :

$$v_{scan} = d \times f \times (1 - S_x/100) \quad (2.10)$$

Діаметр плями $d = 50 \text{ мкм} = 50 \times 10^{-6} \text{ м}$, частота $f = 10^5 \text{ Гц}$

Бажане перекриття $S_x = 80\%$

$$v_{scan} = (50 \times 10^{-6} \text{ м}) \times (10^5 \text{ Гц}) \times (1 - 0,8) = (5 \text{ м}) \times 0,2 = 1 \text{ м/с}$$

Для досягнення більшої глибини або кращої якості поверхні часто використовують кілька проходів.

Кількість проходів N_{passes} визначається бажаною загальною глибиною обробки H_{total} та глибиною за один прохід h .

$$N_{passes} = \frac{H_{total}}{h} \quad (2.11)$$

Також для зняття великого об'єму матеріалу використовують стратегію растрового сканування з кроком між лініями сканування S_y (зазвичай рівним діаметру плями або меншим для перекриття)

Припустимо, що бажана загальна глибина обробки $H_{total} = 100$ мкм, а глибина за один імпульс $h \approx 23,2$ мкм, то кількість імпульсів на одну точку для досягнення такої глибини буде

$$N_{imp} = H_{total} / h = 100 / 23,2 \approx 4,3.$$

Тобто на кожну точку нам потрібно 4-5 імпульсів. Якщо швидкість сканування підібрана так, що забезпечено 4-5 імпульсів на точку, то це буде один прохід. Якщо ж потрібно декілька проходів тоді N_{passes} розраховується відповідно до загальної кількості імпульсів на точку, яка розділена на кількість імпульсів за один прохід.

Поріг лазерного руйнування (Laser-Induced Damage Threshold, LIDT) – це мінімальна щільність енергії (флюенс) або щільність потужності (інтенсивність), за якої в матеріалі відбуваються незворотні зміни (пошкодження, абляція). Це критичний параметр, що залежить від матеріалу, довжини хвилі, тривалості імпульсу, а також якості поверхні.

Поріг може бути виражений флюенсом F_{th} (Дж/см²) або інтенсивністю I_{th} (Вт/ см²). Для імпульсних лазерів частіше використовується флюенс [18]:

$$F_{th} = I_{th} \times \tau \quad (2.12)$$

де τ – тривалість імпульсу (с)

Однією з важливих характеристик лазерного резонатора є добротність. Розрахунок добротності проводимо на основі теорії відкритих оптичних резонаторів, яка визначається основним чином втратами у дзеркалах та дифракційними втратами

$$Q = \frac{2\pi l}{\alpha_p} \frac{1}{1 - R^2 + \alpha_{диф}}, \quad (2.13)$$

де R – коефіцієнт відбиття від дзеркала,

$\alpha_{\text{диф}}$ – відносна втрата потужності сигналу за одне проходження вздовж резонатора внаслідок дифракції.

2.3. Моделі і методи обробки оптичних матеріалів

Обробка оптичних матеріалів – це складний технологічний процес, що вимагає високої точності та контролю. Комп'ютеризовані системи забезпечують автоматизацію та оптимізацію цих процесів. Основними методами обробки, які підлягають автоматизації та інтеграції в комп'ютеризовані системи, є:

Абразивна обробка (шліфування та полірування): Це базові методи, що використовуються для формування поверхні оптичних деталей. Шліфування забезпечує видалення значного обсягу матеріалу та формування початкової геометрії, тоді як полірування доводить поверхню до необхідної оптичної якості. В комп'ютеризованих системах реалізується точне дозування абразивного матеріалу, контроль тиску інструмента та траєкторії його руху. Сучасні системи використовують також адаптивні алгоритми для компенсації зносу інструмента та нерівномірності знімання матеріалу [20].

Однією з ключових концепцій у моделюванні абразивної обробки є модель видалення матеріалу, яка часто базується на рівнянні Престона [21]. Це емпіричне рівняння, що описує швидкість знімання матеріалу (dR/dt) як функцію тиску (P), відносної швидкості між інструментом і заготівкою (v), та константи Престона (k):

$$\frac{dR}{dt} = k \times P \times v, \quad (2.14)$$

де $\frac{dR}{dt}$ – швидкість знімання матеріалу (наприклад, мкм/хв).

k – константа Престона, яка залежить від властивостей матеріалу заготівки, абразиву, полірувальника та середовища обробки (наприклад, мкм/(Па·м/с)).

P – тиск інструмента на поверхню (Па).

v – відносна швидкість руху інструмента по поверхні (м/с).

Ця формула дозволяє прогнозувати обсяг знятого матеріалу в певній точці та оптимізувати траєкторію інструмента для досягнення бажаної форми.

Діамантове точіння (Diamond Turning): Цей метод дозволяє отримати надзвичайно високу якість поверхні та точність форми для ряду оптичних матеріалів (наприклад, алюмінієвих сплавів, пластиків). Він базується на використанні надтвердих діамантових різців. Комп'ютеризовані системи керують багатовісними верстатами, забезпечуючи нанометрову точність позиціонування інструмента та формування складних асферичних і вільних форм [24].

При моделюванні діамантового точіння важливим є контроль глибини різання (a_p) та подачі на оберт (f), які безпосередньо впливають на шорсткість поверхні (R_a) та форму стружки. Ідеальна шорсткість поверхні в теорії може бути оцінена за формулою:

$$R_a \approx \frac{f^2}{8R}, \quad (2.15)$$

де R_a – середньоарифметичне відхилення профілю (мкм),

f – подача на оберт (мм/об),

R – радіус при вершині різця (мм).

Врахування цієї формули, а також пружних відновлень матеріалу та динамічних характеристик верстата, дозволяє досягати надвисокої точності обробки.

Магнітореологічне полірування (MRF – Magnetorheological Finishing): Цей високоточний метод неабразивної обробки використовує магнітореологічну рідину, що містить абразивні частинки, для селективного видалення матеріалу. В'язкість рідини та її реологічні властивості контролюються магнітним полем, що дозволяє локально змінювати тиск і швидкість видалення матеріалу. Комп'ютеризовані системи точно контролюють подачу рідини, магнітне поле та траєкторію обробки для корекції помилок форми поверхні [25].

Модель знімання матеріалу в MRF часто описується як згортка профілю видалення матеріалу (Influence Function – IF) з часом перебування або швидкістю руху інструмента над поверхнею. Швидкість знімання матеріалу в точці (x, y) визначається за формулою:

$$\frac{\partial Z(x,y)}{\partial t} = K \times V(x,y), \quad (2.16)$$

де $\frac{\partial Z(x,y)}{\partial t}$ – швидкість знімання матеріалу в точці (x,y) ,

K – константа, що залежить від властивостей MR-рідини, концентрації абразиву та напруженості магнітного поля,

$V(x,y)$ – швидкість руху рідини (або інструмента) в точці (x,y) .

Фактично, кінцевий профіль поверхні $Z_{final}(x,y)$ після обробки може бути представлений як згортка початкового профілю $Z_{initial}(x,y)$ з функцією впливу $IF(x,y)$ та часом перебування $T(x,y)$:

$$Z_{final}(x,y) = Z_{initial}(x,y) - \iint IF(x-x', y-y') \times T(x', y') dx' dy' \quad (2.17)$$

Ця модель дозволяє розрахувати оптимальний час перебування інструмента в кожній точці для корекції помилок форми.

Моделювання є ключовим етапом розробки та оптимізації комп'ютеризованих систем обробки. Воно дозволяє передбачати поведінку матеріалу, інструмента та всього технологічного процесу, мінімізуючи кількість експериментальних випробувань та зменшуючи час розробки.

Моделювання знімання матеріалу: Для кожного методу обробки розробляються математичні моделі, що описують кінетику знімання матеріалу. Ці моделі враховують такі фактори, як властивості матеріалу, характеристики абразиву (розмір, концентрація), тиск інструмента, швидкість обертання, температура зони обробки тощо [27]. Для абразивного шліфування та полірування часто використовуються моделі, засновані на механіці руйнування матеріалів або на статистичних підходах. У випадку діамантового точіння моделі описують процес різання на мікрорівні, враховуючи пружні та пластичні деформації.

Моделювання теплових процесів: Обробка оптичних матеріалів часто супроводжується виділенням значної кількості тепла, що може призвести до деформацій та зміни властивостей матеріалу. Теплові моделі допомагають спрогнозувати розподіл температури в деталі та інструменті, а також оцінити

вплив термічних напружень на якість обробки [28]. Використовуються методи скінченних елементів (МСЕ) для розв'язання рівнянь теплопровідності.

Загальне рівняння теплопровідності в трьох вимірах:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \times (k \nabla T) + q''' , \quad (2.18)$$

де ρ – густина матеріалу (кг/м^3), C_p – питома теплоємність ($\text{Дж/(кг} \cdot \text{К)}$), T – температура (К), t – час (с), k – коефіцієнт теплопровідності ($\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$), ∇ – оператор набла, q''' – об'ємна потужність джерела тепла (Вт/м^3).

Ці моделі дозволяють визначати температурні поля в заготовці та прогнозувати термічні деформації, які можуть вплинути на точність форми.

Моделювання динаміки системи "верстат-інструмент-деталь": Для забезпечення високої точності обробки важливо враховувати вібрації та динамічні характеристики всієї системи. Моделі динаміки дозволяють ідентифікувати резонансні частоти, оптимізувати жорсткість верстата та підібрати оптимальні режими обробки для мінімізації вібрацій, що впливають на якість поверхні [29].

Динамічна поведінка системи часто описується за допомогою рівняння руху для багатоступеневої системи:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F(t) \quad (2.19)$$

де M – матриця мас системи, C – матриця демпфування, K – матриця жорсткості. x – вектор переміщень, $F(t)$ – вектор зовнішніх сил, що діють на систему, $\ddot{x}$, $\dot{x}$ – вектори швидкостей та прискорень відповідно.

Розв'язання цього рівняння дозволяє аналізувати власні частоти та форми коливань, а також реакцію системи на збурення.

Моделювання формування поверхні та помилок форми: На основі моделей знімання матеріалу та динамічних моделей розробляються алгоритми для прогнозування кінцевої форми поверхні та оцінки її відхилень від ідеалу. Це дозволяє розробити стратегії компенсації помилок, наприклад, шляхом зміни траєкторії інструмента або оптимізації параметрів обробки. Застосовуються методи апроксимації поверхні поліномами Церніке або іншими функціями [30].

Поліноми Церніке (Zernike polynomials) широко використовуються для опису аберацій та помилок форми оптичних поверхонь. Будь-яку функцію помилки поверхні $W(\rho, \theta)$ на круговій апертурі можна розкласти в ряд Церніке:

$$W(\rho, \theta) = \sum_{n,m} A_{nm} Z_{nm}(\rho, \theta)$$

Де:

A_{nm} – коефіцієнти Церніке, що характеризують величину конкретної аберації.

$Z_{nm}(\rho, \theta)$ – поліноми Церніке, які є ортогональними на одиничному колі та описують різні типи аберацій (наприклад, нахил, дефокус, астигматизм, кома, сферична аберація).

ρ – нормований радіальний координата ($0 \leq \rho \leq 1$).

θ – кутова координата.

Моделювання дозволяє спрогнозувати ці коефіцієнти після обробки та розробити стратегію корекції.

2.4. Методи керування та оптимізації в комп'ютеризованих системах

Ефективне функціонування комп'ютеризованої системи обробки неможливе без продуманих методів керування та оптимізації.

Системи числового програмного керування (ЧПК): Основою більшості комп'ютеризованих систем є ЧПК, що забезпечує точне позиціонування інструмента та керування всіма рухомими елементами верстата за заданою програмою. Сучасні системи ЧПК інтегруються з CAD/CAM системами для автоматичного генерування траєкторій обробки зі складними формами [31].

Адаптивне керування: У процесі обробки можуть виникати непередбачені фактори, такі як знос інструмента, зміна властивостей матеріалу, або зовнішні збурення. Адаптивні системи керування дозволяють коригувати параметри обробки в реальному часі на основі даних, отриманих від датчиків. Це може бути контроль тиску, температури, сили різання або вібрації [32].

Прикладом адаптивного керування може бути використання ПІД-регулятора (Пропорційно-Інтегрально-Диференціального) для підтримки заданого параметра (наприклад, тиску, сили):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.20)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал,

$e(t)$ – похибка (різниця між заданим значенням і вимірним),

K_p , K_i , K_d – коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференціальної складових відповідно.

ПІД-регулятори є основою багатьох адаптивних систем завдяки своїй надійності та можливості тонкого налаштування.

Оптимізація технологічних параметрів: Вибір оптимальних режимів обробки (швидкість, подача, тиск, концентрація абразиву тощо) є критичним для досягнення бажаної якості та продуктивності. Застосовуються різні методи оптимізації, включаючи генетичні алгоритми, методи рою частинок, методи Монте-Карло, а також на основі штучних нейронних мереж для обробки великих обсягів експериментальних даних [33].

Завдання оптимізації часто формулюється як мінімізація або максимізація цільової функції $F(x)$, де x – вектор параметрів:

$$x = \min F(x) \text{ або } x = \max F(x)$$

За умови дотримання певних обмежень:

$$g_i(x) \leq 0$$

$$h_j(x) = 0$$

Де $g_i(x)$ – обмеження-нерівності

$h_j(x)$ – обмеження-рівності.

Діагностика та моніторинг: Комп'ютеризовані системи інтегрують датчики для моніторингу стану обладнання та ходу технологічного процесу. Це дозволяє своєчасно виявляти відхилення від норми, передбачати можливі збої та проводити профілактичне обслуговування. Методи діагностики можуть

включати аналіз акустичних сигналів, вібрації, температурних полів, а також візуальний контроль [34].

2.5. Висновки до розділу 2

У другому розділі роботи ключова увага зосереджена на методологічному обґрунтуванні вибору методів обробки, їх детальному математичному описі та побудові комплексних моделей. Ці моделі є критично важливими для попереднього прогнозування ефективності майбутньої системи ще до етапу її фізичної реалізації.

Було доцільно обґрунтовано застосування лазерного шліфування як основного методу обробки, підкреслюючи його унікальні переваги: безконтактний вплив, високу контрольованість глибини зняття матеріалу та забезпечення виняткової чистоти обробленої поверхні. Для оптимізації цього процесу виконано численні розрахунки таких параметрів, як щільність потужності, флюєнс, глибина абляції та швидкість сканування. Це дало змогу точно встановити оптимальні робочі параметри, враховуючи специфічну довжину хвилі Nd:YAG лазера та тип оброблюваного матеріалу.

Проведено аналіз та моделювання сучасних комп'ютеризованих методів обробки, включаючи абразивне полірування, діамантове точіння, магнітореологічну обробку та іонно-променеве полірування. Кожен з цих методів був детально змодельований з точки зору кінетики знімання матеріалу, впливу теплових ефектів та динаміки руху інструмента. Отримані результати моделювання лягли в основу розробки адаптивних алгоритмів керування, що дозволяють системі динамічно підлаштовуватися під зміни умов.

Окремо розглянуті різноманітні методи керування процесом: від традиційного числового програмного керування (ЧПК) до більш складних систем адаптивного керування з використанням ПД-регуляторів та оптимізації технологічних параметрів за допомогою алгоритмів штучного інтелекту. Такий комплексний підхід до керування дозволяє інтегрувати в систему функції

автоматичної корекції помилок, значно підвищити стабільність процесу обробки та ефективно запобігати перегріву й надмірному зносу матеріалу та інструментів.

Таким чином, розроблені теплові, динамічні, статистичні та аналітичні моделі створили міцну основу для забезпечення ефективного, гнучкого та високоточного керування технологічним процесом лазерної обробки на всіх його етапах.

3 РОЗРОБКА СИСТЕМИ ТА ОПИС ЇЇ РОБОТИ

3.1 Компоненти та архітектура комп'ютеризованої системи лазерної обробки

Комп'ютеризовані системи лазерної обробки оптичних матеріалів є складними мехатронними комплексами, що поєднують оптичні, механічні, електронні та програмні компоненти. Їхня архітектура спрямована на забезпечення високої точності, повторюваності та гнучкості технологічних процесів. Типова комп'ютеризована система включає такі ключові елементи: лазерний випромінювач, систему формування та доставки лазерного променя, механічну систему позиціонування (координатний стіл), систему керування, датчики та спеціалізоване програмне забезпечення. Розглянемо детальніше основні компоненти системи, використовуючи як приклад структурну схему (рис. 3.1), яка відображає загальні принципи побудови таких комплексів [9].

Устаткування для лазерної обробки оптичних матеріалів складається з:

- випромінювача;
- системи формування і транспортування випромінювання і газу;
- координатного пристрою;
- автоматизованої системи управління (АСУ).

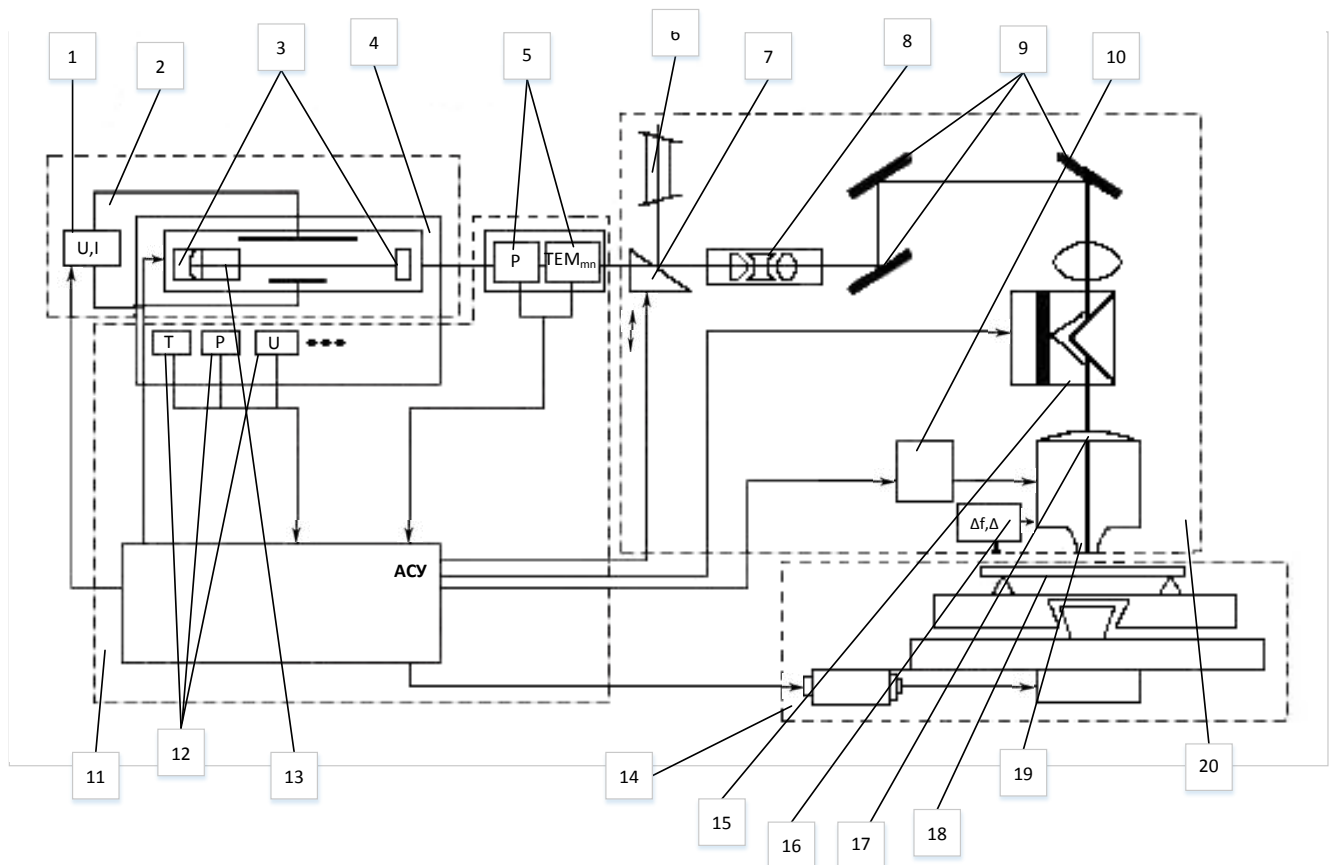


Рисунок 3.1. Структурна схема автоматизованої системи лазерної обробки оптичних матеріалів: 1 - система наповнення; 2 – випромінювач; 3 - дзеркала; 4 - квантрон; 5 - блок вимірювання параметрів лазерного пучка; 6 - юстувальний лазер; 7 - оптичний затвор; 8 - об'єктив; 9 - поворотні дзеркала; 10 - система подачі газу; 11 - АСУ; 12 - датчики контролю; 13 – модулятор; 14 - координатний стіл; 15 – фільтр; 16 – оптична система стабілізації фокальної площини; 17 - фокусувальна система; 18 - зразок; 19 – сопло; 20 - система газового продуву

Випромінювач генерує лазерне випромінювання з необхідними для різання оптичними, енергетичними і просторово-часовими параметрами. До його складу входять:

- елементи системи наповнення;
- активне середовище;
- дзеркала резонатора;
- при необхідності, пристрій модуляції випромінювання.

Система формування та транспортування випромінювання і газу призначена для передачі лазерного пучка від випромінювача до оброблюваної деталі, а також для формування необхідних параметрів газу, що надходить в зону різку через сопло. До складу даної системи входять:

- юстувальні лазер;
- оптичний затвор;
- оптичні трансформатори (об'єктиви);
- поворотні дзеркала;
- пристрій обертання площини поляризації;
- фокусуються система;
- система стабілізації становища фокальній площині і зазору;
- система подачі газу;
- сопло.

За допомогою координатного пристрою виконується відносне переміщення лазерного променя і деталі в просторі. Такий пристрій містить двигуни, привід, виконавчі механізми.

АСУ призначена для контролю і управління параметрами лазера, передачі команд на виконавчі модулі координатного пристрою і системи формування і транспортування випромінювання і газу. До складу АСУ входять:

- підсистема датчиків параметрів лазера (температури, тиску, складу робочої суміші і ін.);
- підсистема датчиків параметрів випромінювання (розбіжність, потужності, стабільності осі діаграми спрямованості і ін.);
- підсистема управління затвором;
- підсистема управління адаптивною оптикою;
- підсистема управління координатним пристроєм.

Оптична схема фокусування лазерного пучка наведена на рисунку 3.2.

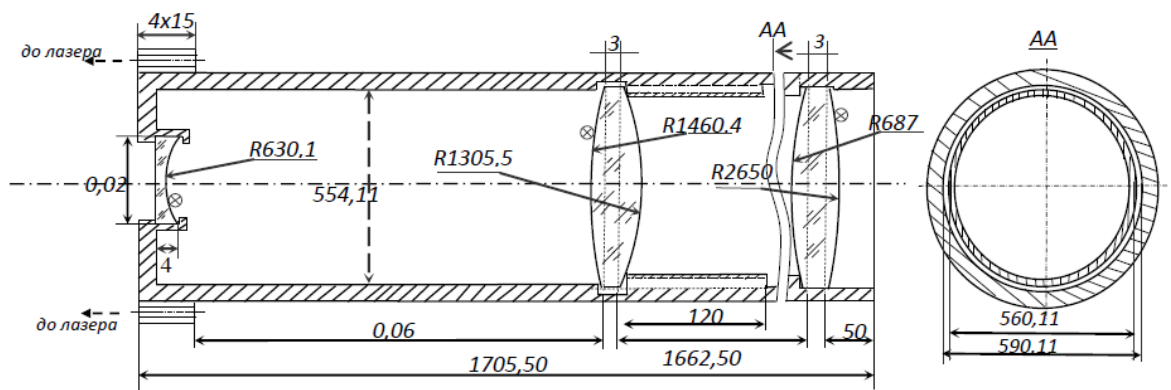


Рисунок 3.2. Схема фокусування лазерного пучка

В основі будь-якої лазерної системи лежить лазерний випромінювач, ключовими елементами якого є активне середовище та оптичний резонатор. Активне середовище є джерелом когерентного випромінювання, а оптичний резонатор забезпечує умови для його підсилення та формування спрямованого променя. Розуміння принципів їх побудови та взаємодії є фундаментальним для розробки та експлуатації лазерних технологічних установок.

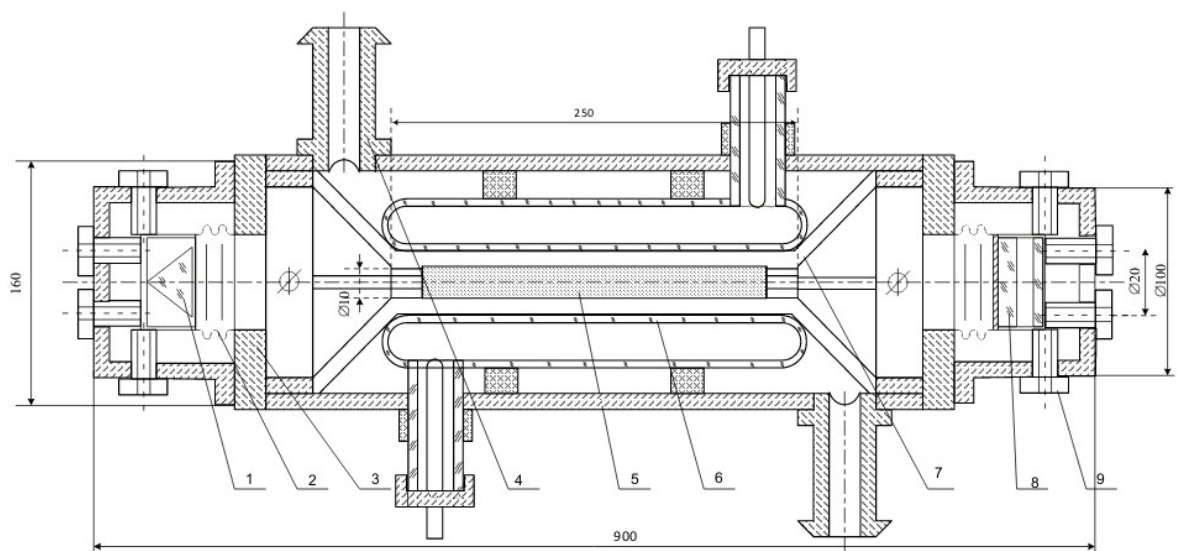


Рисунок 3.3. Конструкція лазерного випромінювача: 1 - Призма повного внутрішнього відбиття, 2 – Сільфон, 3 – Фланець, 4 – Штуцер, 5 - Лазерний кристал $Y_3Al_5O_{12}:Nd^{3+}$, 6 - Лампа накачки, 7 – Коронка, 8 - Резонансний відбивач, 9 - Юстувальний гвинт

Блок живлення випромінювача забезпечує стабільне електроживлення лазерного випромінювача з необхідними напругою та струмом. Для імпульсних лазерів він також відповідає за формування високовольтних імпульсів для накачки лазерного середовища. Якість і стабільність живлення безпосередньо впливають на стабільність вихідних параметрів лазерного променя [9].

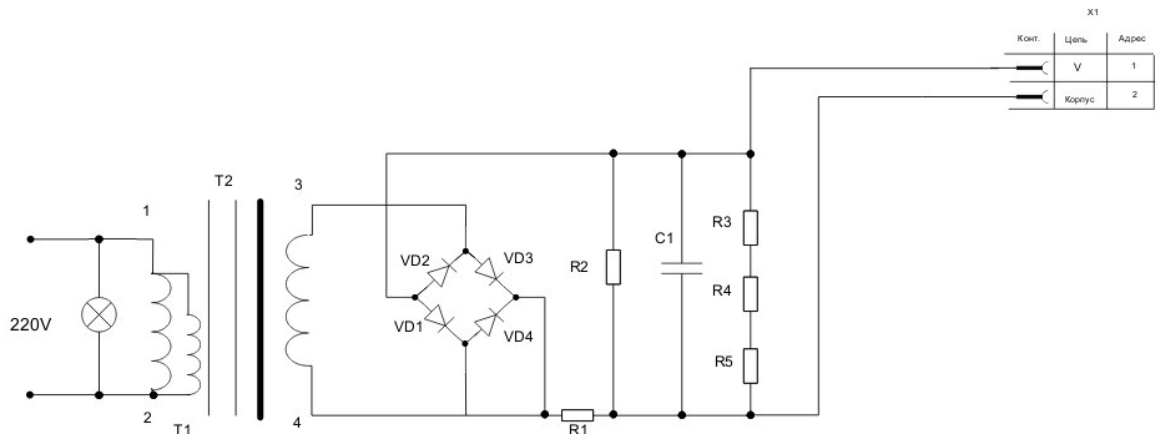


Рисунок 3.4. Принципова схема блоку живлення лазера

На рис. 3.4 представлена принципова електрична схема блоку живлення, що демонструє ключові компоненти, такі як трансформатори (T1, T2), діодні мости (VD1-VD4), конденсатори (C1) та резистори (R1-R5), які формують необхідні напруги для роботи лазера.

Блок живлення затвора (3): Окремий блок, який подає живлення на акустооптичний або електрооптичний затвор, що використовується для модуляції добротності резонатора або відсікання частини імпульсу. Це дозволяє формувати короткі та потужні лазерні імпульси [1].

Акустооптичний затвор (4): Пристрій для швидкого керування параметрами лазерного променя, такими як потужність або тривалість імпульсу. Акустооптичні затвори працюють на принципі дифракції світла на акустичних хвилях у кристалі, що дозволяє дуже швидко вмикати/вимикати або модулювати промінь [9].

Система контролю (5): Цей блок є центральним елементом для збору даних з різних датчиків (температури, положення, потужності лазера) та передачі

керуючих сигналів до виконавчих пристроїв. Вона забезпечує моніторинг усіх критичних параметрів системи в реальному часі та взаємодію між апаратними та програмними компонентами [10].

Скануюча головка (6): Призначена для швидкого та точного переміщення лазерного променя по поверхні оброблюваного матеріалу. Вона зазвичай містить гальванометричні дзеркала, які відхиляють промінь у двох вимірах, та F-theta об'єktiv для фокусування променя та підтримки постійного розміру плями в площині сканування [2].

Плата інтерфейсів (7): Забезпечує зв'язок між системою керування, датчиками, виконавчими механізмами та персональним комп'ютером. Вона перетворює цифрові сигнали з ПК на аналогові сигнали для керування двигунами та іншими компонентами, а також збирає дані з датчиків для обробки та аналізу [9].

Датчик (8): Різноманітні датчики використовуються для моніторингу процесу обробки: датчики температури, оптичні датчики (для контролю інтенсивності або якості променя), датчики положення (для точного контролю координат столу та скануючої головки). Дані з них передаються до системи контролю для забезпечення зворотного зв'язку та адаптивного керування [12].

Координатний стіл (9): Високоточний механічний пристрій, що забезпечує переміщення оброблюваної заготовки відносно лазерного променя. Зазвичай це багатоосний стіл (X-Y, а також можливо Z та обертові осі), що приводиться в рух прецизійними серводвигунами. Точність та повторюваність переміщень столу є критично важливими для якості обробки [7].

ПК із спеціалізованим ПЗ (10): Персональний комп'ютер зі спеціалізованим програмним забезпеченням є головним елементом керування всією системою. ПЗ дозволяє оператору задавати параметри обробки, програмувати траєкторії, візуалізувати процес, збирати та аналізувати дані. Сучасне ПЗ часто включає модулі CAD/CAM для автоматичної генерації керуючих програм [9, 13, 14].

Така архітектура дозволяє автоматизувати складні процеси лазерної обробки, мінімізувати вплив людського фактора та забезпечити високу якість кінцевого продукту.

Особливу увагу приділено вибору пірометричного датчика, який має відповісти таким характеристикам:

- високою чутливістю;
- низькі шуми;
- висока захищеність від зовнішніх перешкод;
- висока температурна стабільність;
- високе відношення якість-ціна.

Більшість датчиків (піроприймачів) які випускаються в даний час, мають диференціальну структуру з двох чутливих елементів включених для компенсації зовнішніх наведень протифазно в парах. Таким чином детектор реагує тільки на градієнт температури між двома площадками. В той час, як фонове значення температури компенсується за рахунок протифазного включення площадок. Датчики захищені металевим корпусом і має вбудований підсилювач. Таке рішення будови застосовується у всіх світових виробників піроприймачів таких як: Murata, Nippon, Elmer, Ceramiks.

Для блоку контролю обираємо оптоволоконний пірометр, який може застосовуватись в промисловості, науковій діяльності для дистанційного безконтактного вимірювання температури контрольованого об'єкта у важкодоступних місцях. Використання гнучкої волоконної оптики дозволяє розміщувати приймач випромінювання і електроніку віддалено для об'єктів з підвищеною температурою навколишнього середовища до 200° С без охолодження оптичної головки. Оптоволоконний пірометри доступні з додатковою вбудованою лазерною системою, яка забезпечує точне наведення плями на об'єкті контролю.

Виробники оптоволоконних пірометрів конструктивно укладають оптоволокну в захисну оболонку захищаючи його від різних зовнішніх факторів. Що звичайно виправдане при використанні оптоволоконних пірометрів в

жорстких умовах промислових цехів у складі рухомих і вібруючих механізмів. Однак для використання таких пірометрів в медицині іноді виникає необхідність мінімізувати діаметр оптоволоконного тракту з метою ефективної його доставки в потрібну досліджувану зону.

Для передачі потоку вимірюваного теплового випромінювання від об'єкта на датчик широке застосування отримали наступні оптичні волокна: халькогенідні волокна для середнього ІЧ-діапазону, вони працюють в діапазоні від 1,1 до 6,5 мкм; порожнинні волокна (HWG) для середнього ІЧ-діапазону, працюють в діапазоні від 2 до 14 мкм; полікристалічні волокна для середнього ІЧ-діапазону працюють в діапазоні від 3 до 18 мкм; фторидні волокна на основі фтористого цирконію (ZrF_4) з робочим діапазоном в області довжин хвиль від 2,3 до 4,1 мкм або фториду індію (InF_3) з високим коефіцієнтом пропускання від 3,2 до 5,5 мкм і ін.

PIR-волокна прозорі в широкому спектральному діапазоні 3 ... 18 мкм і працюють в широкому температурному діапазоні від 4 до 420 К. PIR-волокна гнучкі, не токсичні, не гігроскопічні, не виявляють ефекту старіння і мають високу перешкодозахищеність.

Компанією Фотоніка Плюс (м. Черкаси) ведуться роботи над вирішенням цього завдання в напрямку створення надчутливих, перешкодозахисних приймальних пристроїв і застосування світловодів в комплексі з використанням мікрооптики. Вибір потрібного оптичного волокна базується на аналізі існуючого ринку волокон та вивчені їх технічних характеристик. Пропонується полікристалічне PIR-волокно для середнього ІЧ-діапазону. Серцевина $AgCl$ 0,25: Ag Bm 0,75; оболонка $AgCl$ 0,50: $AgBm$ 0,50.

Для комп'ютеризованої системи лазерної обробки оптичних матеріалів пропонується оптоволоконний пірометр на основі датчика Murata IRA-E420, заальний вигляд засобу контролю наведено на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 Оптиволоконний пірометр для контролю температури у робочій зоні системи лазерної обробки матеріалів

3.2 Конструкція і опис роботи комп'ютеризованої системи лазерної обробки

Функціонування технологічної установки базується на принципі індукованого лазерного випромінювання. Це випромінювання генерується шляхом оптичного накачування активного середовища випромінювача за допомогою газорозрядної лампи.

Конструктивно установка інтегрована у модульну систему, що складається з таких ключових блоків:

- Випромінювач Nd:YAG з інтегрованим пілотним діодним лазером.
- Скануюча головка RayLaser виробництва Німеччини.
- Джерело живлення для лазерного випромінювача.
- Акустооптичний затвор.
- Джерело живлення акустооптичного затвора (модель ИПА 03-50-30).
- Автономна водяна система охолодження.
- Персональний комп'ютер з блоком керування та спеціалізованим програмним забезпеченням RayLaser.
- Технологічна кабіна.

Представлена система є сучасним технологічним комплексом, що інтегрує низку високотехнологічних компонентів. В її основу покладено складний блок випромінювача, який ефективно охолоджується автономною водяною системою. Система живлення комплектується платами для управління розрядною дугою та силової комутації, що забезпечує стабільну роботу установки.

Керування та моніторинг функціонування комплексу здійснюється за допомогою розвинених блоків управління та контролю, оснащених температурними датчиками, датчиками напруги та іншими сенсорними елементами. Централізоване управління здійснюється за допомогою персонального комп'ютера, на якому інстальовано спеціалізоване програмне забезпечення. Це програмне забезпечення надає оператору можливість прецизійно регулювати потужність лазера, контролювати роботу акустооптичного затвора та керувати блоком сканування.

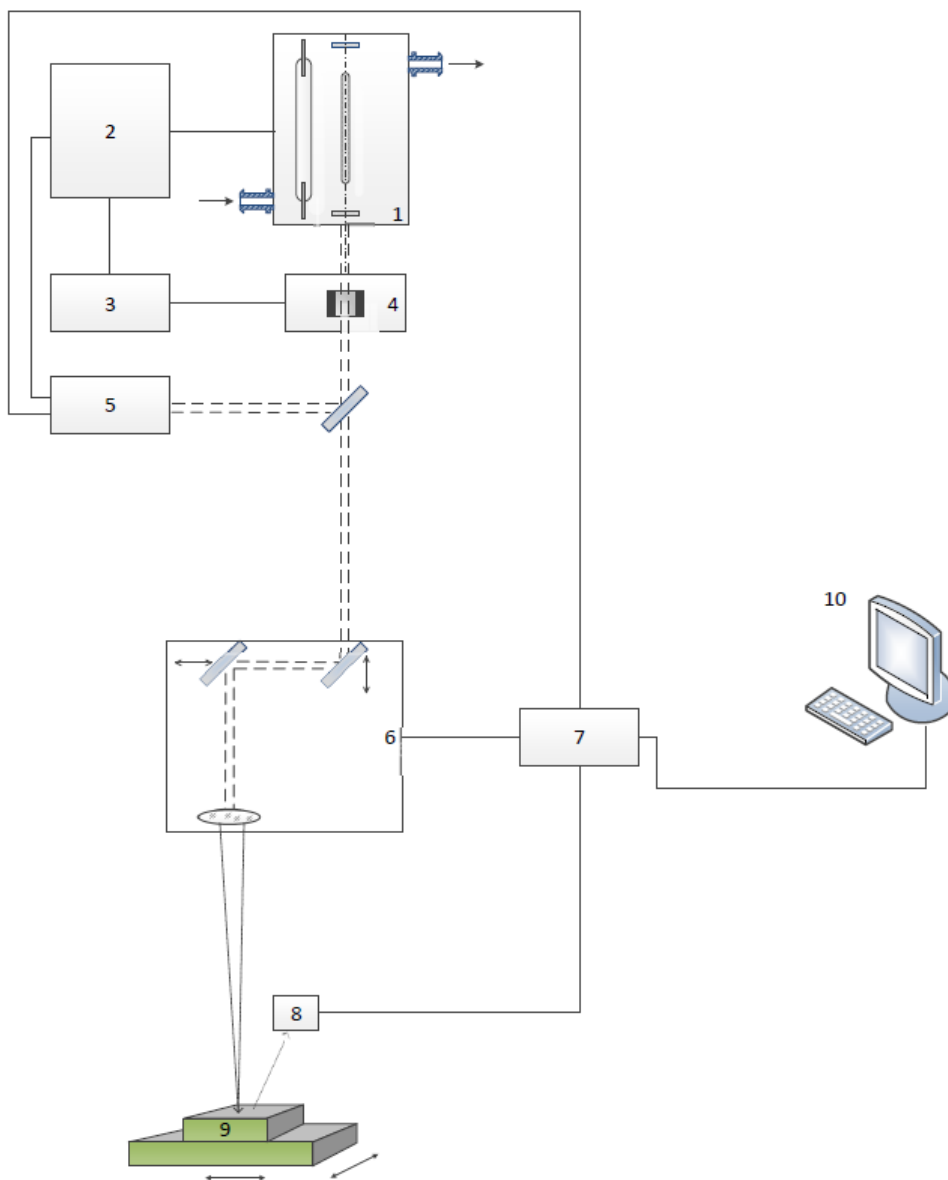


Рисунок 3.6 Узагальнена схема комп'ютеризованої системи лазерної обробки:

- 1 - Лазерний випромінювач, 2 – Блок живлення випромінювача, 3 – Блок живлення затвора, 4 – Акустооптичний затвор, 5 – Ситсема контролю, 6 – Скануюча головка, 7 – Плата інтерфейсів, 8 – Датчик, 9 - Координатний стіл, 10 – ПК із спеціалізованим ПЗ

Після формування та керування за допомогою скануючої системи, вихідне лазерне випромінювання спрямовується на рухомий координатний стіл. На цьому столі розміщується оброблюваний оптичний матеріал, що дозволяє виконувати точне шліфування. Представлена принципова схема ілюструє

архітектуру комп'ютеризованої системи, призначеної для обробки оптичних матеріалів. Система складається з низки взаємопов'язаних функціональних блоків. Блок живлення забезпечує подачу електричної енергії до всіх компонентів установки. Ємнісний накопичувач акумулює електричну енергію, необхідну для формування високовольтних імпульсів, що використовуються для накачки лазера. Система керування – це центральний контрольний блок, який отримує сигнали від системи програмного управління та координує роботу всіх підсистем, забезпечуючи задані параметри лазерного випромінювання та переміщення об'єкта обробки. Блок підпалу генерує імпульси високої напруги для ініціації розряду в газорозрядних лампах, що використовуються для оптичної накачки активного середовища лазерної головки. Лазерна головка є основним компонентом установки, що містить активне середовище лазера, наприклад, Nd:YAG кристал або скло та резонатор. У ній відбувається генерація лазерного випромінювання. Система охолодження підтримує оптимальний температурний режим роботи лазерної головки та інших чутливих елементів, запобігаючи їх перегріву та забезпечуючи стабільність характеристик випромінювання. Система стабілізації випромінювання призначена для забезпечення стабільності параметрів лазерного випромінювання, таких як потужність, енергія та частота, що критично важливо для досягнення високої якості обробки. Датчик енергії випромінювання моніторить енергетичні характеристики лазерного імпульсу, передаючи дані до системи керування для зворотного зв'язку та корекції параметрів. Оптична система - це комплекс оптичних елементів (лінз, дзеркал), що формує, спрямовує та фокусує лазерний промінь на поверхню оброблюваної деталі. Сфокусований промінь лазера взаємодіє з поверхнею матеріалу, викликаючи необхідні зміни. Оброблювана деталь - об'єкт, що піддається лазерній обробці, в нашому випадку оптичний матеріал. Координатний стіл який є механічним пристроєм, що забезпечує точне позиціонування та переміщення оброблюваної деталі у площині, дозволяючи виконувати обробку за заданою траєкторією. Система програмного управління - це комп'ютерний комплекс зі спеціалізованим програмним забезпеченням (Персональний комп'ютер), який

визначає логіку роботи всієї установки, задає параметри обробки, траєкторії руху та контролює виконання технологічного процесу.

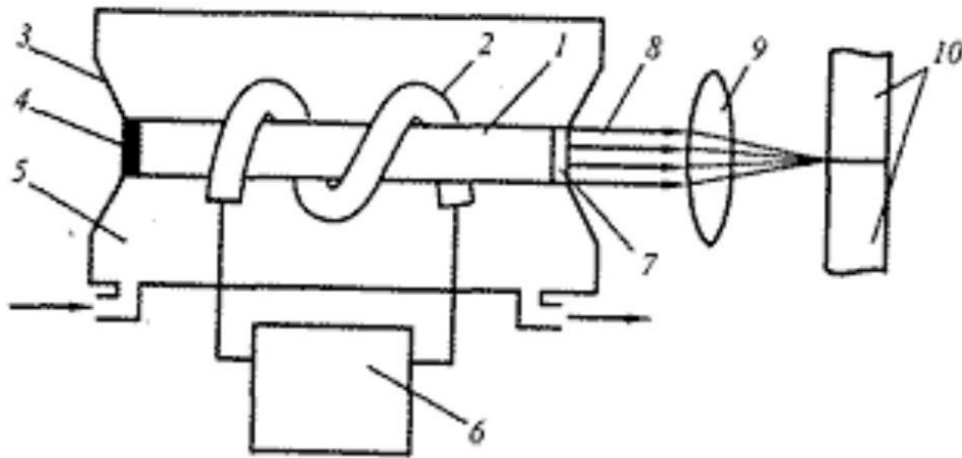


Рисунок 3.7. Схема лазерного випромінювача: 1 – лазерний кристал; 2 - генератор накачування; 3 - відбивач; 4 - непрозоре дзеркало; 5 - охолоджувальне середовище; 6 - джерело живлення; 7 - напівпрозоре дзеркало; 8 - світловий промінь; 9 - фокусуюча лінза; 10 - оброблюваний матеріал

Представлена на рисунку 3.7. оптична схема розкриває принципи побудови та функціонування імпульсного лазерного випромінювача на основі рубінового кристала. Ця конфігурація є класичною для твердотільних лазерів з ламповою накачкою і демонструє ключові елементи, необхідні для генерації когерентного випромінювання.

Кристал (1) - це центральний елемент схеми, що виконує роль активного середовища лазера.

Генератор накачування (2) функціонує як джерело енергії для оптичної накачки активного середовища. У випадку рубінових лазерів, як правило, використовуються імпульсні газорозрядні лампи (наприклад, ксенонові або криптонові). Ці лампи, заповнені інертним газом під тиском, при проходженні потужного електричного імпульсу генерують інтенсивне широкосмугове світло. Спектр випромінювання лампи повинен мати значне перекриття зі смугами

поглинання кристала для ефективного збудження іонів до вищих енергетичних рівнів. Лампа розташовується поруч або навколо стрижня для максимальної ефективності передачі енергії.

Відбивач (3) - це оптична порожнина або рефлектор, що оточує рубіновий стрижень (1) та генератор накачування (2). Його основне призначення — ефективно збирати випромінювання від лампи накачки і спрямовувати його до активного елемента. Відбивач може мати еліптичну або циліндричну форму з високоефективною відбивною поверхнею (наприклад, полірований алюміній або покриття діелектричними шарами), що мінімізує втрати світлової енергії та забезпечує рівномірне освітлення всього об'єму стрижня.

Непрозоре дзеркало (4) формує один з торців оптичного резонатора. Це дзеркало має практично 100% коефіцієнт відбиття на довжині хвилі генерації лазера. Його функція полягає у забезпеченні багаторазового проходження фотонів через активне середовище. Фотони, що генеруються в результаті спонтанного випромінювання або індукованих переходів, відбиваються від цього дзеркала, посилюючись при кожному проходженні через збуджені іони рубіна.

Охолоджувальне середовище (5). Надзвичайно важливий компонент для стабільної та ефективної роботи імпульсного лазера. Під час оптичної накачки значна частина енергії перетворюється на тепло, що може призвести до перегріву рубінового стрижня та лампи. Перегрів викликає термічну деформацію кристала, зміну його оптичних властивостей (термічні лінзи, деполяризація) та зниження ефективності генерації. Циркуляція охолоджуючої рідини (зазвичай деіонізованої води, що володіє хорошими теплопровідними та діелектричними властивостями) навколо активного середовища та лампи забезпечує ефективний тепловідвід, підтримуючи оптимальний температурний режим і стабільність випромінювання.

Джерело живлення (6) складається з високовольтного джерела живлення та ємнісних накопичувачів енергії. Воно відповідає за подачу потужних електричних імпульсів до генератора накачування (2). Заряд ємнісних

накопичувачів до високої напруги та їх швидкий розряд через лампу створює необхідний інтенсивний спалах світла для оптичної накачки.

Напівпрозоре дзеркало (7) – це друге дзеркало оптичного резонатора. На відміну від непрозорого дзеркала (4), воно має певний оптимальний коефіцієнт відбиття (зазвичай від 30% до 90%, залежно від типу лазера та вимог до вихідної енергії) та відповідний коефіцієнт пропускання на довжині хвилі лазерної генерації. Частина світла, що проходить через це дзеркало, формує вихідний лазерний промінь (8). Вибір оптимального коефіцієнта пропускання є критичним для максимізації вихідної потужності/енергії лазера.

Світловий промінь (8) - це когерентне, монохроматичне та високоспрямоване лазерне випромінювання, що виходить з оптичного резонатора через напівпрозоре дзеркало (7). Завдяки процесам індукованого випромінювання та багаторазовим проходкам у резонаторі, промінь набуває характерних для лазерного світла властивостей.

Фокусуюча лінза (9) являє собою оптичну систему (зазвичай одну або декілька лінз), яка призначена для збирання паралельного або слаботорзбіжного лазерного променя (8) у дуже малу пляму (пляма фокуса) на поверхні оброблюваного матеріалу (10). Малий розмір плями дозволяє досягти надзвичайно високої щільності потужності (Вт/см^2) або щільності енергії (Дж/см^2), що є необхідною умовою для ефективної лазерної обробки матеріалів, такої як абляція, плавлення, випаровування або модифікація структури.

Оброблюваний матеріал (10)- це оптичний матеріал, на який спрямовується сфокусований лазерний промінь. Взаємодія високоінтенсивного лазерного випромінювання з лінзою, призмою, фотонним кристалом призводить до локального нагріву, плавлення, випаровування, хімічних змін або інших фізичних ефектів, що дозволяють виконувати таку технологічну операцію, як шліфування.

3.3 Висновки до розділу 3

У третьому розділі роботи реалізовано ключову практичну частину проєкту, що охоплює безпосереднє проєктування та розробку комп'ютеризованої системи лазерної обробки. Система являє собою складний комплекс взаємопов'язаних апаратних і програмних модулів, ретельно спроектованих для досягнення максимальної ефективності та точності.

Детально побудована структурна схема системи, яка чітко визначає взаємодію її основних функціональних блоків: лазерного випромінювача (Nd:YAG лазера), оптичного тракту, високоточного координатного стола, центрального блоку управління, системи температурного моніторингу та стабілізованого блоку живлення. Кожен з цих елементів розроблений для забезпечення надійної та синхронізованої роботи.

Особлива увага приділена розробці функціональної електричної схеми, що включає схему живлення лазера, модуль швидкісного затвора, а також принципи модуляції випромінювання за допомогою акустооптичних елементів. Це дозволяє гнучко керувати параметрами лазерного імпульсу. Описано функціонал блоку керування, який забезпечує багатопараметричний контроль: моніторинг температури робочої зони, точне керування положенням координатного стола з мікронною точністю, а також адаптивне регулювання потужності лазерного випромінювання в режимі реального часу. Впровадження широкого спектра датчиків (потужності, температури, позиціонування) гарантує безперервний збір зворотного зв'язку, що є критично важливим для забезпечення високої точності та стабільності процесу обробки.

Оптична частина системи, як ключовий елемент, включає ретельно продумані схеми фокусування лазерного променя, стабілізації фокальної площини та точного юстування. Ці компоненти розроблені для мінімізації оптичних аберацій, забезпечення стабільності фокусної відстані навіть при тривалій роботі та надання можливості швидкої адаптації системи до обробки різних типів матеріалів та складних геометричних форм.

Таким чином, розроблена система є комплексним рішенням, що поєднує в собі високу точність обробки, значну гнучкість у застосуванні, виняткову стабільність роботи та широкі можливості для інтеграції з сучасними цифровими технологіями та промисловими стандартами. Це робить її надзвичайно актуальною та перспективною для застосування у високотехнологічних галузях, таких як промислове виробництво оптичних компонентів, наукові дослідження в матеріалознавстві та мікротехніці, а також у медичних додатках, де потрібна прецизійна обробка.

ВИСНОВКИ

У ході виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи спроектовано та розроблено схеми комп'ютеризованої системи лазерної обробки оптичних матеріалів. В основі системи лежить Nd:YAG лазер з довжиною хвилі 1064 нм, що забезпечує високу точність та ефективність процесу, доповнену можливостями візуального та температурного контролю робочої зони.

Ключовими результатами роботи стали:

- Комплексний аналіз та обґрунтування: проведено аналіз сучасних підходів до лазерної обробки (різання, шліфування, гравіювання, абляція), що дозволило обґрунтувати вибір елементної бази для розроблюваної системи.
- Розробка архітектури і конструкції системи: створено повний набір схем – структурну, оптичну, електричну та функціональну – які деталізують принцип дії системи, забезпечуючи генерацію та фокусування лазерного випромінювання, а також ефективне керування та моніторинг температури та інших параметрів обробки.
- Моделювання та оптимізація процесів: Виконано моделювання ключових фізичних процесів, зокрема розрахунки щільності потужності, глибини абляції, швидкості сканування та теплових впливів. Ці моделювання підтвердили ефективність прийнятих конструктивних та параметричних рішень, забезпечуючи оптимальні умови для обробки.
- Система діагностики та контролю: Обґрунтовано вибір та впроваджено методи діагностики та контролю, що дозволяють здійснювати температурний контроль стану оброблюваного зразка в реальному часі.

Спроектowana комп'ютеризована система лазерної обробки відповідає поставленому технічному завданню та є гнучким високоефективним інструментом лазерної обробки оптичних та інших матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Національний науковий центр «Інститут метрології». Основні напрямки діяльності ННЦ «Інститут метрології» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.metrology.kharkov.ua/index.php?id=1059>
2. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Федоренко Є. П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів: монографія. Харків: ФОП Панов А. М., 2020. 100 с.
3. Бондарчук Я. М. Технологія і обробка оптичних матеріалів. Львів: Ліга-Прес, 2001. 176 с.
4. Тужанський С. Є., Лисенко Г. Л. Системи лазерної відеополяриметрії для автоматизованого контролю параметрів неоднорідних біотканин: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2011. 156 с.
5. Сусліков Л.М., Студеняк І.П. Неруйнівні методи контролю: Навчальний посібник. Ужгород: Видавництво УжНУ, 2016. 192 с.
6. Wavelength Opto-Electronic. Напівпровідникова оптика: лазерні технології та технології обробки зображень [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://wavelength-oe.com/uk/semiconductor-optics/>
7. Coherent. ExactCut 430 – High-Precision Laser Cutting System [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.coherent.com/machines-systems/laser-cutting-drilling/exactcut>
8. EKSPLA. FemtoLux 30 – фемтосекундний лазер [Електронний ресурс] // GoPhotonics. Режим доступу: <https://www.gophotonics.com/products/lasers/ekspla/29-268-femtolux-30>
9. IPG Photonics. YLR-200-1030 Ytterbium Single-Mode Fiber Laser: User Manual [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.artisan-g.com/info/IPG_Photonics_YLR_200_1030_Manual_202285163733.pdf
10. Coherent, Inc. UVblade: Laser Lift-Off Processing [Електронний ресурс]. – Santa Clara, CA: Coherent, 2020. Режим доступу:

https://www.coherent.com/resources/datasheet/machines-and-systems/COHR_UVblade_DS_0120_3.pdf

11. Полістар Абразив. Оптоволоконний лазерний верстат імпульсного чищення POLYSTAR LASER PL 200C [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://shop.polystarabrasive.com/ua/p2397071506-optovolokonnij-lazernij-verstat.html>
12. Інтерферометр [Електронний ресурс] // Вікіпедія – вільна енциклопедія. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Інтерферометр>
13. KEYENCE Corporation. 2D/3D лазерний профілометр серії LJ-X8000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.keyence.eu/products/measure/laser-2d/lj-x8000/>
14. Профілометр Mitutoyo Surftest SJ-210 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://speranza-ua.com/kontrol-pokrytij/profilomery-etalony-sheroxovatosti/sj-210/>
15. Microtech. 3D автоматична цехова координатно-вимірювальна машина EXTOL EXT-370 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://microtech.kyiv.ua/3d-vimiryuvannya/koordinatno-vimiryuvalni-mashini/3d-avtomatichna-cekhova-kvm-extol-ext-370>
16. SocTrade. Синхронний термічний аналізатор STA 6000 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://soctrade.ua/obladnannya/perkinelmer-ukr/termichnij-analiz/sinxronni-termichni-analizatori/sta6000/>
17. Bruker. MultiRAM FT-Raman Spectrometer [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.bruker.com/en/products-and-solutions/infrared-and-raman/raman-spectrometers/multiram-ft-raman-spectrometer.html>
18. Romanengo C., Raffo A., Qie Y., Anwer N., Falcidieno B. Fit4CAD: A point cloud benchmark for fitting simple geometric primitives in CAD objects [Електронний ресурс] // Computers & Graphics. – 2021. – Vol. 99. – P. 1–13. – DOI: 10.1016/j.cag.2021.09.013. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0097849321002053>

- 19.Sandia National Laboratories. Laser-based Metrology Systems [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.sandia.gov/research/laser-metrology>
- 20.Newport Corporation. Basics of Laser Measurement [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.newport.com/f/laser-power-and-energy-meters>
- 21.National Instruments. Introduction to NI LabVIEW [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ni.com/en-us/shop/labview.html>
- 22.MathWorks. MATLAB & Simulink for Hardware Calibration [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/solutions/hardware-calibration.html>
- 23.Васильєв, О. М. Технології обробки оптичних матеріалів. Київ: Техніка, 2018. 350 с.
- 24.Петренко, І. В. Прецизійні методи формування оптичних поверхонь. Львів: Видавництво Політехніки, 2020. 280 с.
- 25.Коваленко, С. Д. Магнітореологічне полірування оптичних компонентів. Харків: ХНУ, 2019. 180 с.
- 26.Мельник, Р. П. Іонно-променеве модифікування та полірування оптичних матеріалів. Дніпро: ДНУ, 2021. 220 с.
- 27.Григоренко, Л. А. Моделювання процесів знімання матеріалу при обробці оптичних деталей. Київ: Наукова думка, 2017. 200 с.
- 28.Кравчук, В. І. Теплові процеси в технологіях обробки прецизійних оптичних елементів. Одеса: ОНПУ, 2019. 150 с.
- 29.Ткаченко, Д. С. Динаміка мехатронних систем в оптичному приладобудуванні. Запоріжжя: ЗНТУ, 2022. 250 с.
- 30.Павленко, Ю. О. Оптимізація формування асферичних поверхонь. Суми: СДУ, 2020. 190 с.
- 31.Іванов, В. О. Системи числового програмного керування в оптичній промисловості. Чернівці: ЧНУ, 2018. 300 с.
- 32.Сидоренко, А. Б. Адаптивні системи керування технологічними процесами. Полтава: ПНТУ, 2021. 240 с.

33. Гончаренко, К. В. Застосування методів штучного інтелекту в оптимізації обробки оптичних матеріалів. Вінниця: ВНТУ, 2022. 210 с.
34. Кузьменко, М. П. Діагностика та моніторинг стану обладнання для обробки оптичних матеріалів. Житомир: ЖДУ, 2019. 170 с.

ДОДАТКИ

ПРОТОКОЛ ПЕРЕВІРКИ КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ

Назва роботи: Комп'ютеризована система лазерної обробки оптичних матеріалів

Тип роботи: Бакалаврська кваліфікаційна робота

Підрозділ Кафедра БМІОЕС, ФІЕС, гр. КОІС-216

Коефіцієнт подібності текстових запозичень, виявлених у роботі
системою StrikePlagiarism 8%

Висновок щодо перевірки кваліфікаційної роботи (відмітити потрібне)

V Запозичення, виявлені у роботі, є законними і не містять ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації. Роботу прийняти до захисту

☐ У роботі не виявлено ознак плагіату, фабрикації, фальсифікації, але надмірна кількість текстових запозичень та/або наявність типових розрахунків не дозволяють прийняти рішення про оригінальність та самостійність її виконання. Роботу направити на доопрацювання.

☐ У роботі виявлено ознаки плагіату та/або текстових маніпуляцій як спроб укриття плагіату, фабрикації, фальсифікації, що суперечить вимогам законодавства та нормам академічної доброчесності. Робота до захисту не приймається.

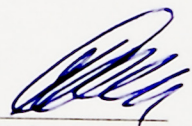
Експертна комісія:

Коваль Л.Г., зав. кафедри БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Заболотна Н.І., проф. каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)



(підпис)



(підпис)

Особа, відповідальна за перевірку



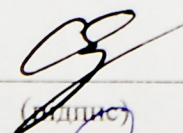
(підпис)

Тужанський С.Є.

(прізвище, ініціали)

З висновком експертної комісії ознайомлений(-на)

Керівник

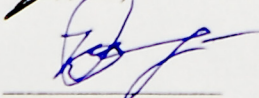


(підпис)

Тужанський С.Є., доцент каф. БМІОЕС

(прізвище, ініціали, посада)

Здобувачка



(підпис)

Кравченко А.О.

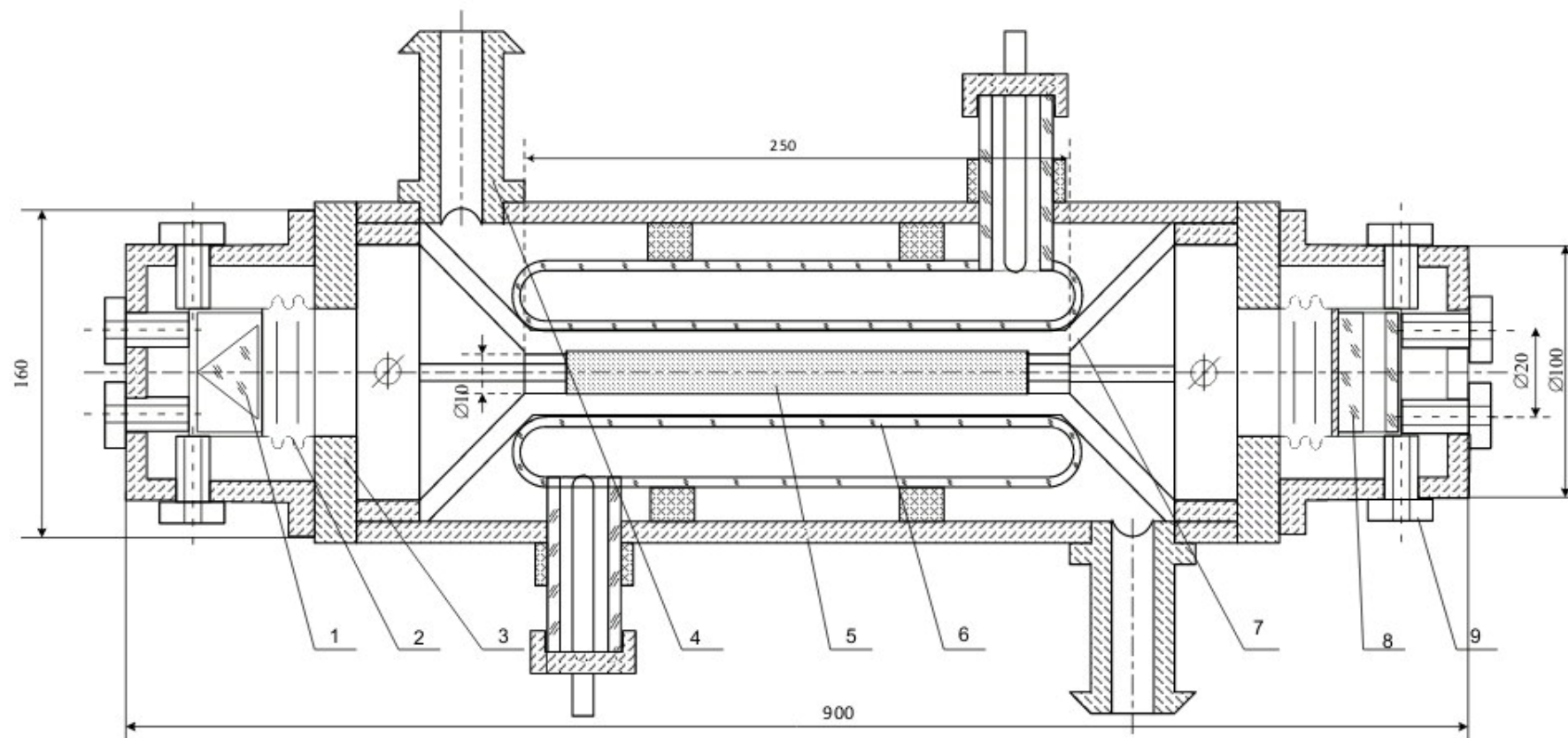
(прізвище, ініціали)

Додаток Б (обов'язковий)

Графічна частина

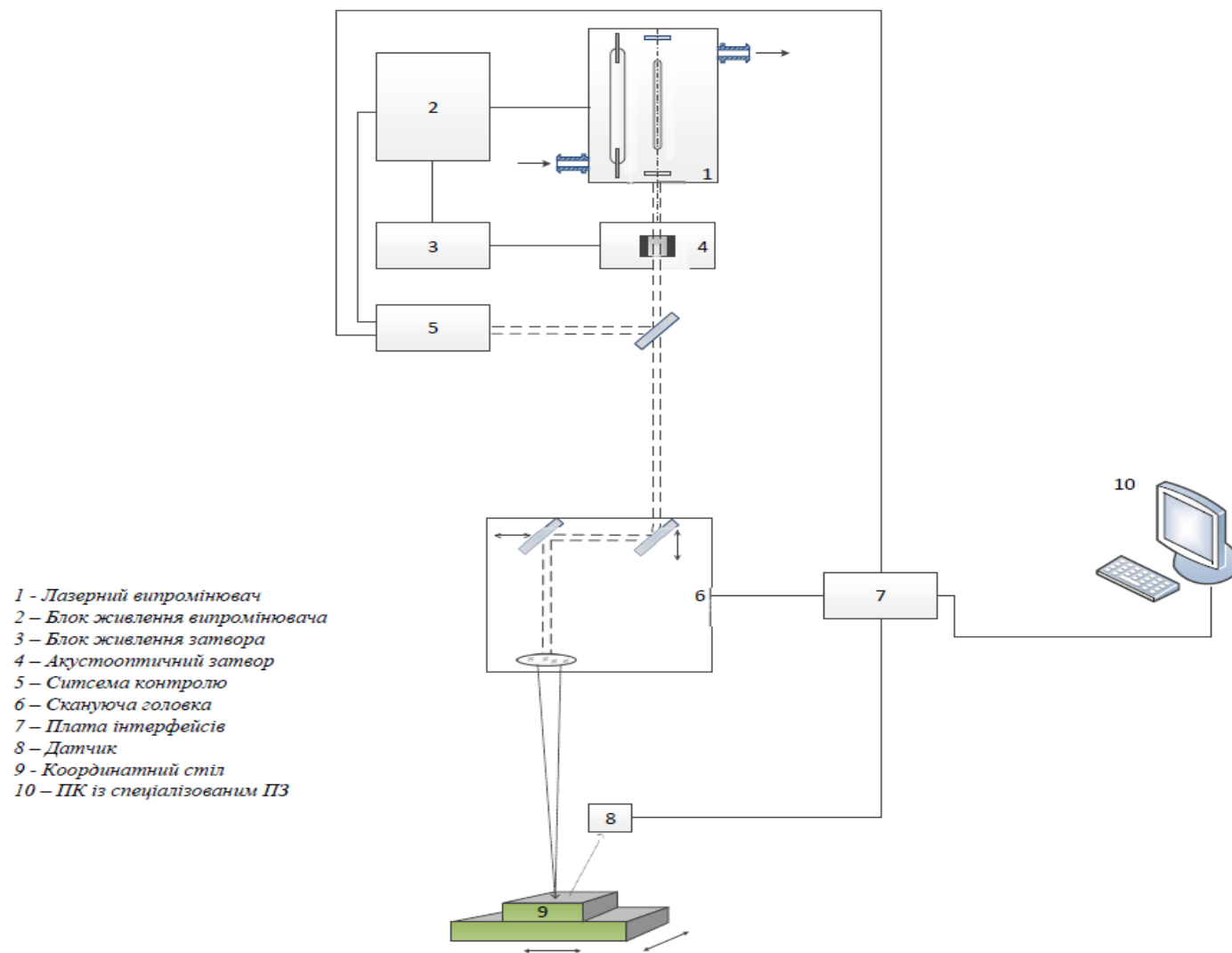
Додаток Б1

Схема випромінювача технологічного лазера



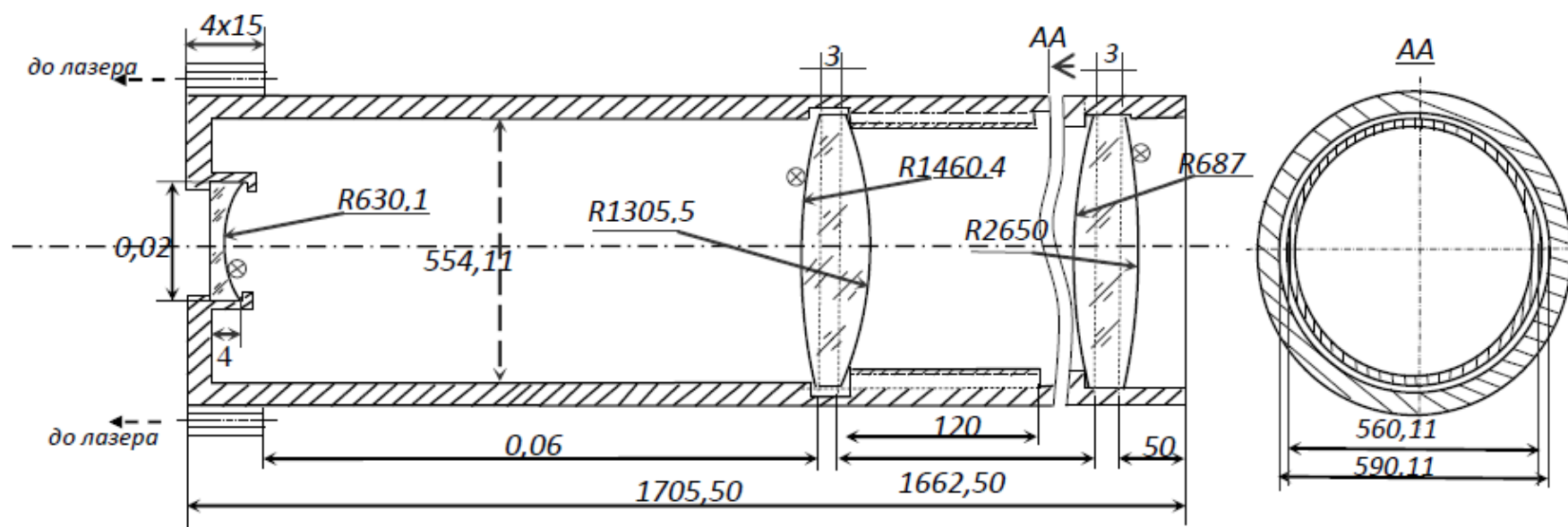
Додаток Б2

Схема структурна комп'ютеризованої системи лазерної обробки оптичних матеріалів



Додаток БЗ

Схема оптична фокусувального блоку випромінювача



Додаток Б4 Схема блоку живлення лазера

