

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)

Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**Пояснювальна записка**

рівень вищої освіти другий (магістерський)  
ЛАЗЕРНА ОБРОБКА ТВЕРДИХ І НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ  
ДЛЯ МІКРООБРОБКИ ТА ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ  
(тема)

Виконав:  
здобувач 2 курсу, групи ЛОЕТм-23-1  
Мальонкін Д.О.  
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні  
технології  
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньої-наукова)

Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна  
техніка»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Афанасьєва О.В.  
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

Гнатенко О.С.  
(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Електронної та біомедичної інженерії  
(повна назва)  
Кафедра Фізичних основ електронної техніки  
(повна назва)  
Рівень вищої освіти другий (магістерський)  
Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні технології  
(код і повна назва)  
Тип програми освітньо-професійна  
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)  
Освітня програма «Лазерна і оптоелектронна техніка»  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Мальонкіну Данилу Олексійовичу  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів для мікрообробки та інженерії поверхні

затверджена наказом університету від « 22 » листопада 2024 р. № 1229 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 27 січня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи Пакет комп'ютерного моделювання Comsol multiphysics.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі \_\_\_\_\_

1 Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів для мікрообробки інженерії поверхонь.

2 Фізичні явища та теоретичні концепції.

3 Моделювання параметрів поверхневої обробки в Comsol multiphysics.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій  
Демонстраційний матеріал – 10 слайдів.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерну обробку твердих і надтвердих матеріалів для	02.09.24 – 27.09.24	Виконано
2	Дослідження фізичних явищ та теоретичних концепцій лазерної обробки твердих і надтвердих матеріалів	01.10.24 – 20.10.24	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик параметрів поверхневої обробки	25.10.24 – 08.11.24	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів поверхневої обробки	11.11.24 – 20.11.24	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	25.11.24 – 22.12.24	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	24.12.24 – 05.02.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	06.01.25 – 15.01.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	17.01.25 – 19.01.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	20.01.25 – 28.01.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2024 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. каф. ФОЕТ Афанасьєва О.В.  
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 43 с. , 24 рис., 4 табл., 1 додаток, 8 джерел.

ЛАЗЕРНЕ РІЗАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ТВЕРДІ ТА НАДТВЕРДІ МАТЕРІАЛИ, ТЕПЛОВІ ЕФЕКТИ, ТРИВАЛІСТЬ ІМПУЛЬСУ, ФІЗИЧНІ ЯВИЩА ТА ТЕОРТИЧНІ КОНЦЕПЦІЇ.

Об'єкт дослідження – моделювання параметрів поверхневої обробки в Comsol Multiphysics.

Мета роботи – використати пакет комп'ютерного моделювання Comsol Multiphysics, для моделювання параметрів поверхневої обробки.

Методи дослідження – аналітичний та чисельний за допомогою Comsol Multiphysics.

У роботі були розглянуті питання щодо лазерної обробки, твердих і надтвердих матеріалів для мікрообробки та інженерії поверхні, фізичні явища та теоритичні концепції матеріалів та про комп'ютерний пакет для моделювання параметрів поверхневої обробки Comsol Multiphysics.

## ABSTRACT

Explanatory note of attestation work: 43 pp., 24 fig., 4 tables, 1 addition, 8 sources.

LASER CUTTING, MODELLING, HARD AND SUPERHARD MATERIALS, PHYSICAL PHENOMENA AND THEORETICAL CONCEPTS, PULSE DURATION, THERMAL EFFECTS.

The object of research – is modelling of surface treatment parameters in Comsol Multiphysics.

The aim of the work is to use the Comsol Multiphysics computer modelling package to simulate the parameters of surface treatment.

Research methods – analytical and numerical with Comsol Multiphysics.

The paper addressed issues related to laser processing, hard and super hard materials for micromachining and surface engineering, physical phenomena and theoretical concepts of materials, and the Comsol Multiphysics computer package for modeling surface treatment parameters.

## ЗМІСТ

Вступ .....	7
1 Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів для мікрообробки та інженерії поверхні .....	8
1.1 Фізичні принципи лазерної обробки матеріалів .....	8
1.2 Лазерне поверхнєве зміцнення .....	10
1.3 Лазерне різання та зварювання.....	11
1.4 Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів .....	12
1.5 Виготовлення поверхневих текстур .....	16
1.6 Вплив довжини хвилі та типу лазера на механізм абляції.....	18
1.7 Вплив тривалості імпульсу на цілісність поверхні .....	21
2 Фізичні явища та теоретичні концепції .....	25
2.1 Теплові ефекти потужного лазерного пучка .....	25
2.2 Роль теплової лінзи .....	29
2.3 Локальне нагрівання сильно поглинального матеріалу лазерним випромінюванням .....	30
2.4 Оптичні параметри атмосфери .....	31
3 Моделювання параметрів поверхневої обробки в comsol multiphysics .....	34
3.1 Огляд програмного забезпечення.....	34
3.2 Створення програми для симуляції обробки матеріалів.....	35
3.3 Моделювання параметрів поверхневої обробки органічного скла.....	37
3.4 Моделювання параметрів поверхневого зміцнення ШХ15-Ш .....	39
Висновки .....	42
Перелік джерел посилання .....	43
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	44

## ВСТУП

Сучасний розвиток технологій вимагає постійного вдосконалення методів обробки матеріалів, що сприяють зростанню якості та функціональності виробів у різних галузях, від електроніки до важкої промисловості. Одним із таких методів є лазерна обробка, що використовується для мікрообробки твердих і надтвердих матеріалів, а також для інженерії поверхні. Лазерна технологія дозволяє досягати високої точності обробки, здійснювати контрольоване локальне нагрівання та змінювати мікроструктуру поверхонь, що особливо важливо для матеріалів з високою твердістю та стійкістю до зносу. Лазерна обробка з її безконтактним впливом, широкими можливостями керування потужністю та мінімізацією теплових деформацій забезпечує створення специфічних функціональних поверхонь, які значно підвищують надійність та довговічність готових виробів.

Актуальність теми дослідження обумовлена потребою в розширенні можливостей обробки надтвердих матеріалів, зокрема, в умовах мікромасштабів, де традиційні методи часто виявляються недостатньо точними або економічно не вигідними. Лазерна технологія відкриває можливості для реалізації унікальних технічних рішень у таких областях, як електроніка, біомедичні пристрої, аерокосмічна промисловість та виробництво інструментів. Основна мета цього дослідження полягає у вивченні процесів, що відбуваються під час лазерної обробки твердих і надтвердих матеріалів, а також у визначенні впливу параметрів лазера на кінцеві характеристики оброблених поверхонь. Це дослідження сприятиме подальшому розвитку технологій, що забезпечують не лише високий рівень точності, але й можливість створення мікроструктур, які поліпшують експлуатаційні властивості продукції.

# 1 ЛАЗЕРНА ОБРОБКА ТВЕРДИХ І НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ МІКРООБРОБКИ ТА ІНЖЕНЕРІЇ ПОВЕРХНІ

## 1.1 Фізичні принципи лазерної обробки матеріалів

Лазери є незамінними у багатьох сферах науки, медицини та промисловості. Сучасну обробку матеріалів складно уявити без застосування лазерних технологій. В активному середовищі лазера світлова енергія запускає процес збудження, і це середовище розташоване між двома дзеркалами або всередині резонатора. Завдяки цьому збудженню атоми активного середовища випромінюють фотони (рис. 1.1), що викликає появу світлової хвилі, яка поступово посилюється між дзеркалами. Одне з дзеркал частково прозоре, що дозволяє частині світла виходити з резонатора і формувати лазерний промінь.

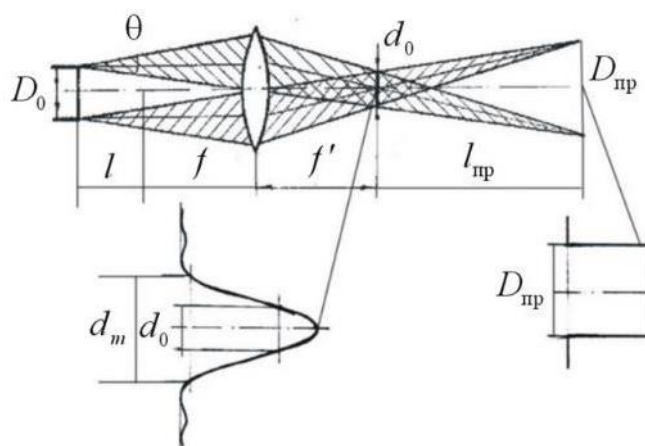


Рисунок 1.1 – Телецентрична модель лазера спільно з оптичною системою

Обробка матеріалів за допомогою лазера – це процес, у якому за заданими параметрами здійснюється контрольований нагрів, причому джерелом енергії виступає лазерний промінь. В основі цього процесу лежить принцип впливу теплової енергії на поверхню матеріалу: частина лазерного випромінювання поглинається, а решта відбивається. Саме цей ефект є основою для багатьох технологій, де застосовується лазер.

Ступінь поглинання і відбиття випромінювання визначається передусім оптичними характеристиками оброблюваного матеріалу. Поглинена енергія лазерного променя призводить до нагрівання поверхні, яке може відбуватися як без розплавлення, так і з його появою. У деяких випадках нагрівання настільки інтенсивне, що може навіть призвести до випаровування матеріалу. Більшість видів лазерної обробки давно використовуються в промисловості, однак і сьогодні новітні проекти знаходяться на етапах досліджень і тестування. Завдяки високій концентрації енергії, можливості обробки деталей будь-яких розмірів, відсутності необхідності вакуумного середовища, простоті транспортування енергії та легкості автоматизації, лазерна обробка матеріалів стала одним з найефективніших і найуніверсальніших методів на сьогодні (рис. 1.2). У останні роки спостерігається значний інтерес до лазерної обробки матеріалів у США, Японії та інших промислово розвинених країнах, які активно фінансують розвиток нових методів обробки поверхонь за допомогою лазерних технологій [1].

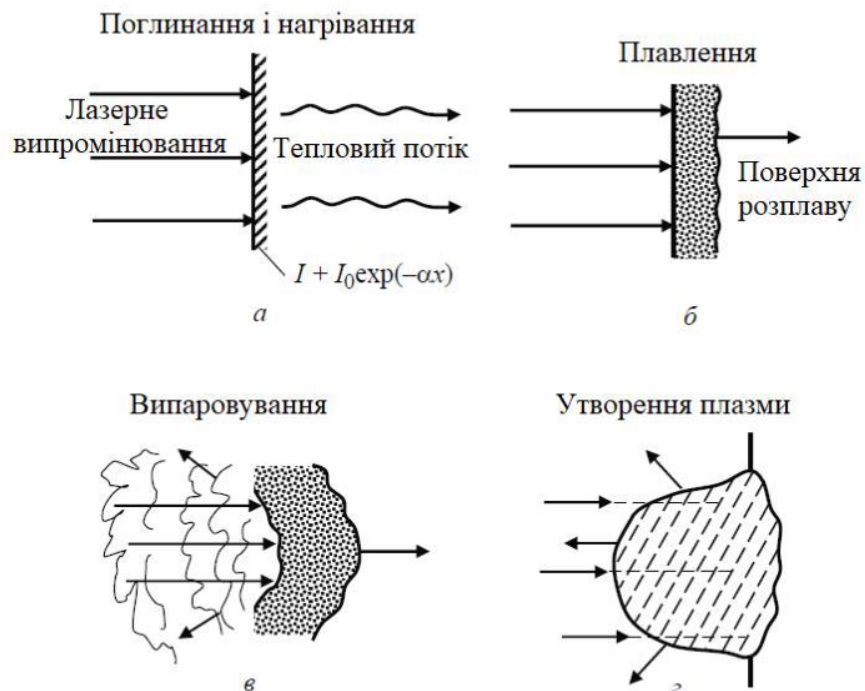


Рисунок 1.2 – Основні фізичні процеси, що виникають при взаємодії

## 1.2 Лазерне поверхнєве зміцнення

Лазерне поверхнєве зміцнення є одним із найпоширеніших методів обробки металів і різних сплавів. Цей сучасний метод термообробки простих речовин вигідно відрізняється від традиційних способів, таких як електричне загартування, загартування з розплавом або обробка струмами високої частоти (табл. 1.1) На відміну від звичних методів, лазерне зміцнення має особливість: воно не потребує об'ємного нагрівання матеріалу, оскільки процес проводиться локально, обмежуючись лише поверхнею вибраної речовини.

Таблиця 1.1 – Види поверхні лазерної обробки

Вид обробки	Щільність потужності, $\text{см}^2$	Швидкість охолодження, с	Глибина ЗТВ, мм
Зміцнення без фазового переходу	$10^3 - 10^4$	$10^4 - 10^5$	0,2 – 0,5
Лазерний відпал (відпустка)	$10^2 - 10^3$	–	0,05 – 0,1
Зміцнення з фазовим переходом	$10^4 - 10^5$	$10^5 - 10^6$	1,2 – 3,0
Лазерне легування	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^6$	0,2 – 2,0
Лазерне наплавлення (напилення)	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^6$	0,02 – 3,0
Амортизація поверхні	$10^6 - 10^8$	$10^4 - 10^6$	0,01 – 0,05
Шокове зміцнення	$10^4 - 10^6$	$10^4 - 10^6$	0,02 – 0,2

Переваги лазерного поверхневого зміцнення перед іншими методами:

– відсутність потреби в охолоджуючих середовищах: цей метод зміцнення робить процес більш безпечним та екологічним, спрощуючи технологічний ланцюг обробки;

– точність локального зміцнення: лазерний промінь дозволяє виконати зміцнення саме тієї ділянки, яка цього потребує, оскільки методика дає змогу сконцентрувати енергію на конкретному місці;

- рівномірне та глибоке зміцнення: лазерне загартування забезпечує рівномірний і глибокий захист поверхневого шару по всій зоні обробки, підвищуючи твердість, зносостійкість та стійкість матеріалу до корозії;

- швидкість і гнучкість обробки: лазерне зміцнення дозволяє обробляти матеріали різних розмірів та складної форми з високою точністю та швидкістю;

- енергоефективність: оскільки енергія спрямовується лише на оброблювану ділянку, це сприяє максимальній ефективності енергоспоживання.

Перші дослідження впливу лазерного випромінювання на різні матеріали, які почали проводити ще в 70-х роках минулого століття, показали, що ця технологія є важливою інновацією для багатьох сфер. У біомедицині, наприклад, лазерна обробка покращує біосумісність матеріалів. Зокрема, при обробці титанових імплантів можна створити мікро- та наноструктури, що сприятимуть швидшому приживленню імплантів у кістковій тканині та формуванню антибактеріальних текстур, які захищають від бактеріального заселення та інфекцій.

Лазерне зміцнення дає змогу керувати властивостями матеріалів на мікро- і нано- рівнях, що відкриває широкі можливості для створення сенсорів, фотонних компонентів та інших високотехнологічних матеріалів у майбутньому. Це також дозволяє покращувати тверді якості графену для збільшення терміну його служби й поліпшення фізичних властивостей. Крім того, технологія забезпечує точну модифікацію будь-якої поверхні, що розширює можливості у створенні нанотехнологічних пристроїв [2].

### 1.3 Лазерне різання та зварювання

Концентрований лазерний промінь, який використовується для точного поділу матеріалу на необхідні компоненти, лежить в основі процесу лазерного різання. Завдяки високій ефективності та універсальності метод широко застосовується в багатьох промислових галузях, що допомагає значно економити час. Основним принципом дії є створення вузької зони нагрівання або плавлення

шляхом фокусування лазера на поверхні матеріалу, де під впливом енергії лазера матеріал починає випаровуватись або розтоплюватись, дозволяючи вирізати точні форми та деталі будь – яких розмірів із різних матеріалів. Відмінною особливістю лазерного різання є відсутність прямого контакту з оброблюваним матеріалом, що знижує знос інструменту та забезпечує високу точність. Крім того, процес дозволяє обробляти складні форми та забезпечує високу продуктивність за рахунок обробки на високих швидкостях (рис. 1.3).

Лазерне зварювання – це метод, що використовує лазерний промінь для з'єднання від двох і більше матеріалів шляхом плавлення або розтоплення їх поверхонь. Лазер концентрується на ділянці стику матеріалів, створюючи надзвичайно високу енергію, яка швидко нагріває поверхні до стану плавлення. Завдяки цьому матеріали змішуються на молекулярному рівні, утворюючи міцні зварні шви [2].

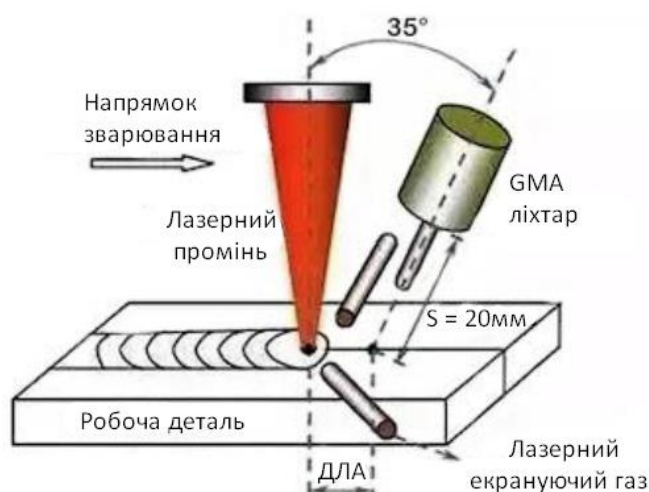


Рисунок 1.3 – Застосування лазерного зварювання

#### 1.4 Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів

Використання твердих і надтвердих матеріалів для створення ріжучих інструментів має великий попит, оскільки ці матеріали володіють винятковими зносостійкими характеристиками. Завдяки тому, що інструменти з таких матеріалів мають довший термін служби та покращують якість обробки, підприємства можуть істотно зекономити на витратах і часу, одночасно

підвищуючи вартість кінцевого продукту. Нині більшість досліджень спрямовані на точність різання, зміни мікроструктури, модифікацію поверхневих властивостей та структурування матеріалів. Удосконалення цих процесів на поверхні інструменту сприяє більш ефективному різанню, знижує тертя, зменшує знос, мінімізує залишкові напруження, покращує видалення стружки та значно збільшує ресурс інструменту. Сьогодні лазерну обробку твердих матеріалів визнають у всьому світі сучасною, ефективною та відтворюваною технологією, яка особливо корисна в поверхневій інженерії надтвердих матеріалів.

Матеріали, твердість яких перевищує 40 ГПа за шкалою Віккерса, називають надтвердими. До їх унікальних характеристик належать висока теплопровідність (понад  $800 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ ), хімічна стійкість та надзвичайна зносостійкість, що робить їх незамінними у багатьох промислових галузях, пов'язаних з обробкою. Серед надтвердих матеріалів найбільш твердими є алмаз і нітрид бору: твердість полікристалічних алмазів типу PCD становить від 40 ГПа до 80 ГПа, природних алмазів – від 59 ГПа до 75 ГПа, а кубічного полікристалічного нітриду бору (PcBN) – від 28 ГПа до 44 ГПа. Тверді матеріали, такі як карбід вольфраму (WC), карбід кремнію (SiC), нітрид титану (TiN) і борид титану (TiB<sub>2</sub>), мають твердість понад 15 ГПа. Їхні властивості значною мірою залежать від розміру і складу зерен, які визначають рівень твердості. Класифікація твердості та надтвердості за шкалою Віккерса приведена в табл. 1.2

Алмаз є однією з алотропних форм вуглецю, і саме його надзвичайно міцний ковалентний зв'язок і тетраедрична кристалічна структура надають йому властивості, які мають велике промислове значення. Для формування алмазів необхідні умови з температурою вище 1583 К і тиском понад 5,2 ГПа, через що вони утворюються на значній глибині – приблизно 140 км під поверхнею Землі, у верхній мантії.

Таблиця 1.2 – Класифікація твердості та надтвердості за шкалою Віккерса

Металеві тверді матеріали >15 ГПа	Ковалентні тверді матеріали >15 ГПа	Іонні тверді матеріали >15 ГПа	Надтверді матеріали >40 ГПа
Карбід вольфраму (WC) Нітрид титану (TiN) Карбід титану (TiC) Нітрид хрому (CrN)	Карбід кремнію (SiC) Нітрид кремнію (SiN) Борид титану (TiB <sub>2</sub> )	Оксид алюмінію (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) Оксид цирконію (ZrO <sub>2</sub> ) Оксид титану (TiO <sub>2</sub> )	Полікристалічний алмаз (PCD) Полікристалічний кубічний нітрид бору (PcBN) Боркарбонітриди (b <sub>x</sub> C <sub>y</sub> N <sub>z</sub> ) Тетрабор вуглець (B <sub>4</sub> C) Природний алмаз (C)

Природні алмази вирізняються унікальною гостротою ріжучого краю, що робить їх ідеальними для високоточного різання. Проте їхня монокристалічна структура має певну схильність до утворення слабких площин.

Виникнення таких властивостей пояснюється тим, що тетраедричні та кубічні структури містять зони з меншою кількістю зв'язків, що впливає на залежність твердості від напрямку. У полікристалічному алмазі (PCD) міцність забезпечується завдяки зрощенню кристалів алмазу та гібридизації. Основною формою гібридизації в природних алмазах є Sp<sup>3</sup>, при якій з чотирьох орбіталей утворюється тетраедрична структура: одна з орбіталей – типу 's', а решта три – типу 'p'. На відміну від цього, графітові структури мають гібридизацію Sp<sup>2</sup>, де присутнє слабке зв'язування між шарами. Під час синтезу критично важливо враховувати ступінь графітизації, оскільки твердість матеріалу залежить від співвідношення гібридизації Sp<sup>2</sup> і Sp<sup>3</sup>. Саме відмінності в гібридизації та фазах зумовлюють різні властивості матеріалів (рис. 1.4) [3].

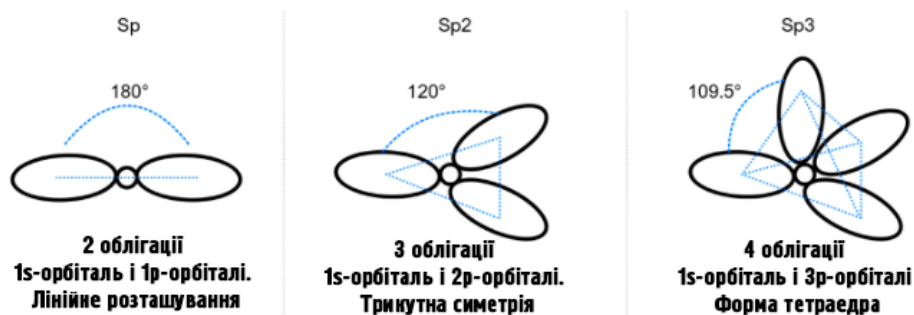
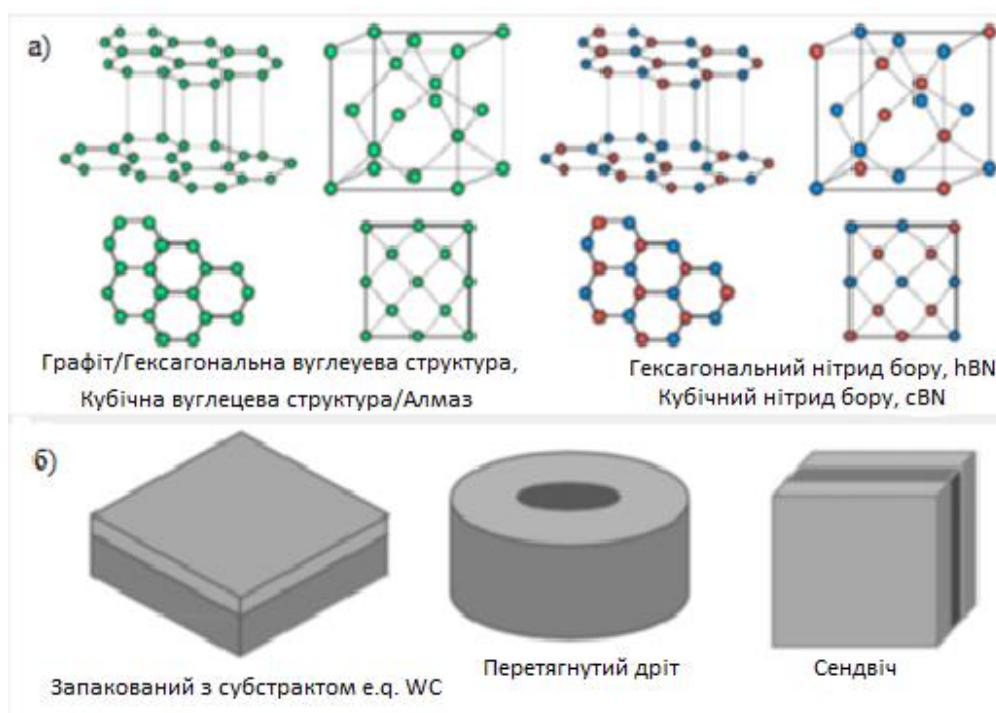


Рисунок 1.4 – Типи гібридизацій

Нітрид бору BN у природі зустрічається рідко, і є лише один офіційно задокументований випадок його виявлення у невеликих кількостях у тибетських офіюлітах, які характеризуються високим вмістом хрому. Це найтвердіший синтетичний матеріал, який часто використовують як заміну PCD при обробці чорних металів, таких як нікель (Ni) та відповідні сплави. Аморфний BN має гібридизацію  $Sp^3$ , тоді як гексагональний hBN відноситься до  $Sp^2$ . У момент спікання аморфний BN формує кубічну структуру в cBN. На рисунку 1.5 наведена схема PCD для порівняння з cBN. Керамічний композит WC не зустрічається в природі, але завдяки ковалентним зв'язкам він має високу твердість, а сполучна речовина додає міцність, що компенсує крихкість кераміки. Комбінація керамічних і металевих властивостей забезпечує композиту міцність і довговічність. У 1950-х роках з'явилися перші спечені дисперсні композити для вольфраму, які замінили дорогі алмазні штампи, а через двадцять років – стали альтернативою для PCD і cBN. Основне завдання композитів – протистояти викликам і загрозам, з якими стикаються природні матеріали, та забезпечити гнучкість їхніх властивостей. Такі матеріали відрізняються високою зносостійкістю, але при низькому вмісті сполучної речовини вони стають більш вразливими до сколів. Зі збільшенням кількості сполучника зростає і в'язкість, але загальна твердість матеріалу знижується. Полікристалічні структури формуються з кристалічних зерен, що мають випадкову орієнтацію на межах зерен. Найслабше зв'язування відбувається на цих межах через нерівномірну довжину зв'язків і слабку координацію. Полікристалічна мікроструктура забезпечує здатність

матеріалу протистояти деформаціям і пошкодженням під впливом навантажень та прикладених сил [3].



а) схема розташування атомів;

б) можливі формати для полікристалічних матеріалів.

Рисунок 1.5 – Схема PCD для порівняння з PcBN

### 1.5 Виготовлення поверхневих текстур

Лазерна обробка надає можливість швидко, безконтактно та з високою ефективністю обробляти тверді і надтверді матеріали, які використовуються для виробництва та модифікації ріжучих інструментів. Цей процес класифікується як фототермічний, оскільки під час нагрівання, випаровування і плавлення відбувається руйнування матеріалу, а якщо часу на ці процеси недостатньо, то матеріал розривається – це вже відноситься до фотохімічного процесу.

Фототеплові перетворення найчастіше виникають лише в умовах повної термодинамічної рівноваги, коли, згідно з законом Бера-Ламберта, поведінка

розплавленого матеріалу визначається передачею тепла і законами механіки рідин:

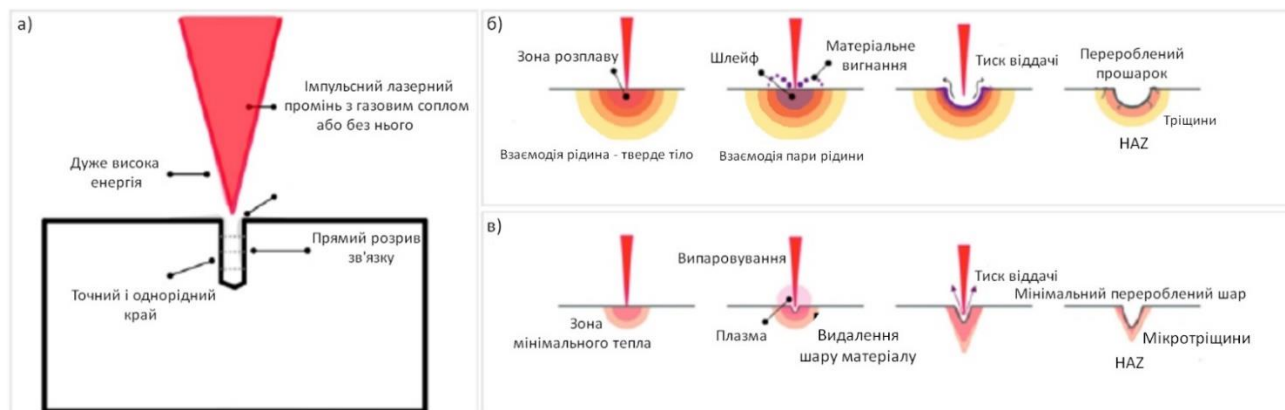
$$I(z) = I_0 e^{-az}, a = \frac{4\pi k}{\lambda}. \quad (1.1)$$

$I(z)$  представляє собою інтенсивність лазерного променя на певній глибині  $z$  в матеріалі. Коефіцієнт поглинання матеріалу позначається як  $\alpha$  і характеризує, скільки енергії поглинається на одиницю довжини. Довжина хвилі лазерного променя позначається символом  $\lambda$ . Коефіцієнт  $k$  відповідає за екстинкцію матеріалу, в той час як  $I_0$  відображає інтенсивність лазерного променя на поверхні.

Електронна заборонена зона матеріалів суттєво впливає на їх здатність до поглинання. Для РСD і РСBN, які мають значну ширину цієї зони, необхідно докласти значну енергію для збудження електронів із валентних зв'язків. Коли досягається цей рівень енергії, виникають електронні дірки, оскільки вільні електрони, що звільняються, здатні збуджувати інші електрони, що залишилися в валентних зв'язках. Провідність у цих матеріалах виникає, коли електрони повертаються в своє стабільне положення, завдяки чому вони вільно передають енергію решітці. У матеріалах без забороненої зони, таких як WC, вільні електрони вже присутні у структурі, що дозволяє провідності виникати миттєво і з набагато меншою витратою енергії.

Імпульсна лазерна абляція є інноваційним, проте вже широко використовуваним методом лазерної обробки, що застосовується для формування поверхневої геометрії різних матеріалів, включаючи тверді та надтверді композити. Цей процес реалізується за допомогою імпульсного лазера, що має постійну тривалість імпульсу, що дозволяє йому функціонувати як у фототермічному, так і в фотохімічному режимах. Лінійність або нелінійність процесу визначається тривалістю імпульсу і флуенсом.

Ефективність цього методу може значно покращитися завдяки багатофотонному поглинанню. Як тільки передана енергія перевищує критичний поріг флюенсу, у матеріалі починається процес абляції. Під час абляції відбувається випаровування і витіснення матеріалу, що призводить до утворення специфічних поверхневих елементів, які виникають через процеси тиску віддачі та сублімації (рис. 1.6) [3].



а) процес абляції; б) флюенс  $\sim$  поріг абляції матеріалу;

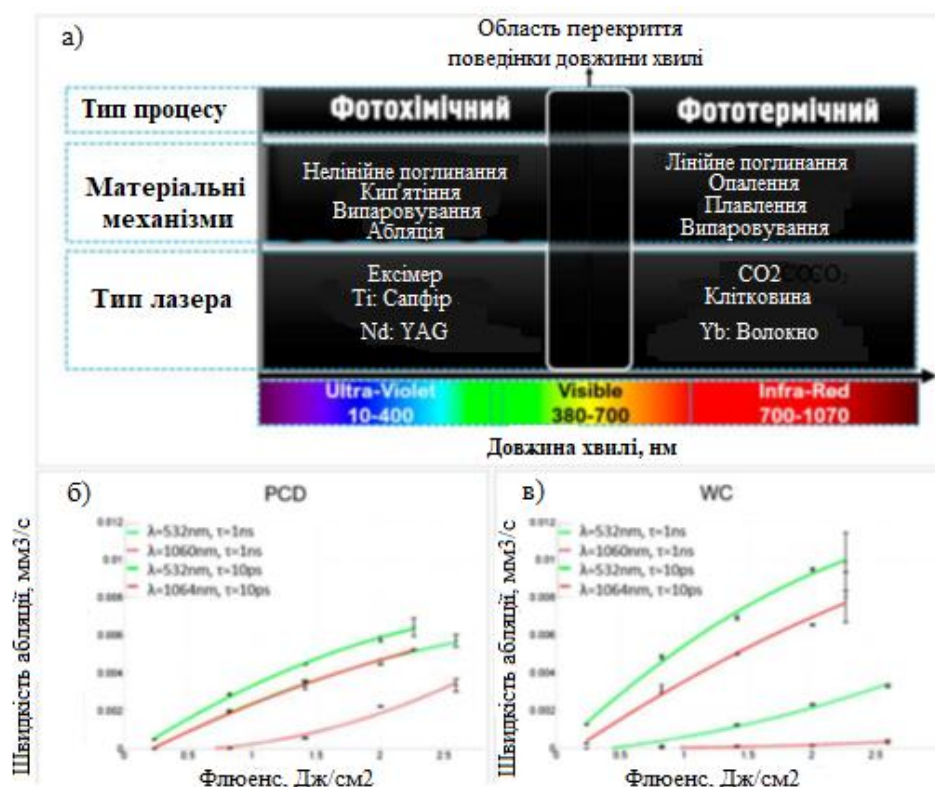
в) флюенс  $>$  поріг абляції матеріалу.

Рисунок 1.6 – Метод лазерної обробки геометрії матеріалів за допомогою імпульсної лазерної абляції

### 1.6 Вплив довжини хвилі та типу лазера на механізм абляції

Процес, який передбачає видалення або руйнування частини матеріалу з оброблювального об'єкта шляхом ерозії, випаровування чи сколювання, називається абляцією. Існує безліч прикладів абляційних матеріалів, зокрема, допоміжні матеріали для космічних ракет і кораблів, які забезпечують їх підйом і вхід в атмосферу. Також до них належать деякі біологічні тканини, що мають широкий спектр застосування, а також сніг і лід у різних формах на поверхні Землі та за її межами. Крім того, існують вогнетривкі покриття, які здатні витримувати екстремальні температури і використовуються для пасивного

захисту від вогню. На рисунку 1.7 нижче зображені матеріали, що характеризуються певними механізмами та поведінкою поглинання.



- а) огляд на поведінку матеріалу на різних довжинах хвиль;  
б) швидкість абляції для PCD; в) швидкість абляції для WC.

Рисунок 1.7 – Характеристика матеріалів певними механізмами та поведінкою поглинання

Зазвичай хвиля довжиною 1064 нм використовується для абляції твердих і надтвердих матеріалів, оскільки забезпечує максимальне поглинання. Проте поглинальна здатність і ефективність оптичного пробою досягають кращих результатів з коротшими довжинами хвиль, наприклад, 532 нм. Це стосується навіть таких матеріалів з високою ізоляцією, як PCD і PсBN, завдяки явищу багатофотонного поглинання. Це поглинання суттєво підвищує рухливість та електронне збудження, що, у свою чергу, призводить до значно вищої швидкості абляції з покращеною точністю. Для PCD-Co абляційна швидкість становить

10 %, тоді як для WC-Co вона дорівнює 4,6 %, і ці значення отримані при використанні двох різних довжин хвиль: 532 нм та 1064 нм. Швидкість абляції залишалася більшою при різних флюенсах і тривалостях імпульсів, коли використовувалася довжина хвилі 532 нм.

Тип лазера, або джерело лазерного випромінювання, є середовищем, що відповідає за дотримання всіх необхідних умов для генерації лазерного променя. Вибір лазера визначає енергію фотонів у пучку. Це особливо важливо в тих випадках, коли потрібен фотохімічний механізм, адже енергія фотона повинна перевищувати енергію зв'язку в матеріалі зразка. На рисунку 1.8 представлено порівняння звичайних молекулярних зв'язків з енергією фотонів, що випромінюються лазерним середовищем у твердих та надтвердих матеріалах.

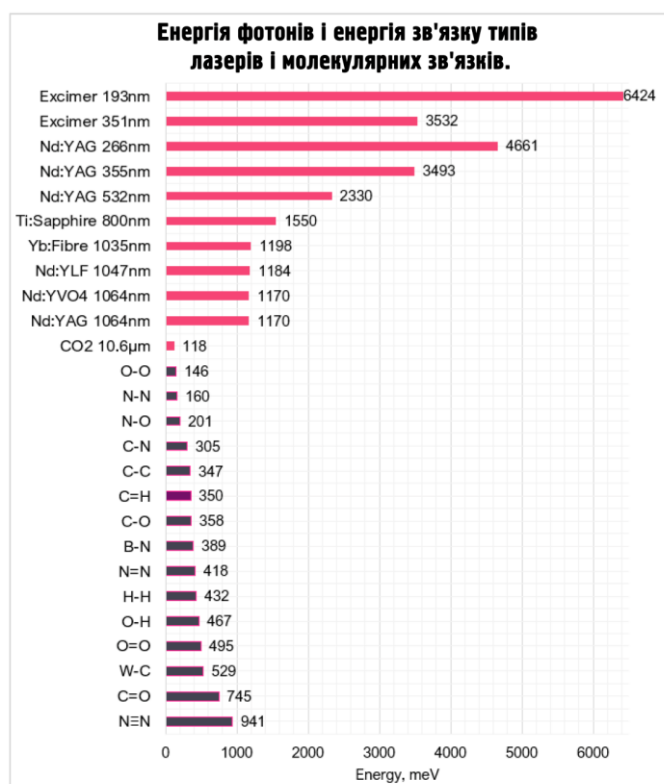


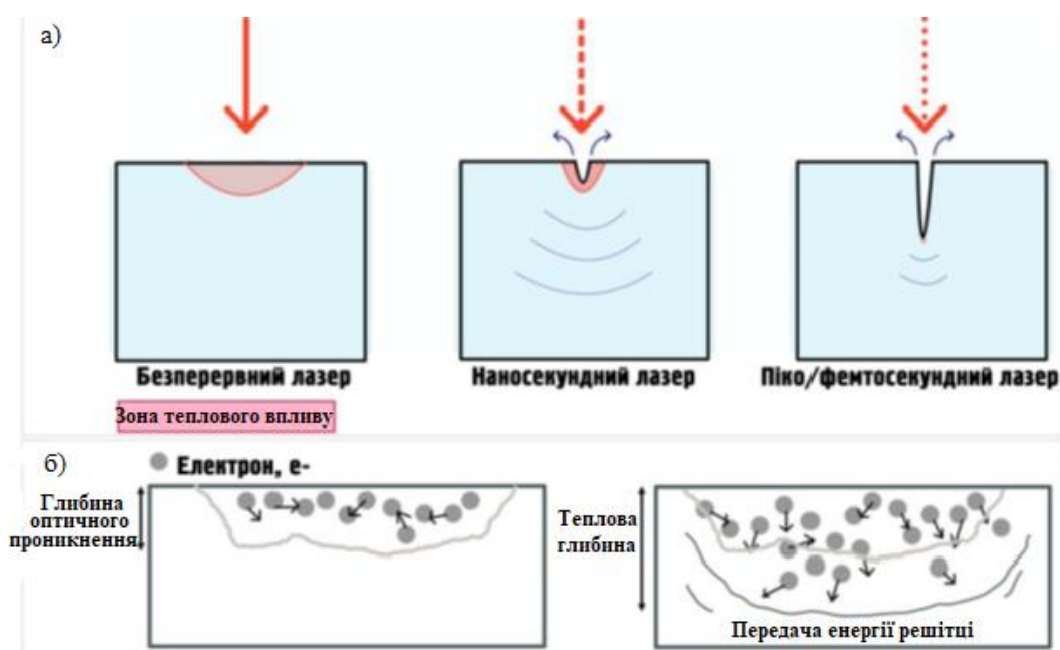
Рисунок 1.8 – Порівняльна діаграма енергії лазерного фотона та значень енергії зв'язку

Волоконні та ексимерні лазери є найпоширенішими в світі для обробки надтвердих і твердих матеріалів. Це також стосується інших лазерних середовищ, таких як Dumitru та Ti, які використовуються для специфічних матеріалів,

зокрема WC, TiC і TiN. Вони продемонстрували повну абляцію інструментів різання, таких як WC-Co з показником 10 %, TiC, TiN та WC-Co 6 %. Лазери ближнього інфрачервоного діапазону, такі як нетербієві Nd лазери, здатні ефективно створювати елементи з надмалими розмірами, досягаючи 20 мкм [4].

### 1.7 Вплив тривалості імпульсу на цілісність поверхні

Тривалість імпульсу, який пройшов процедуру опромінення, визначає, як багато енергії він передає та розподіляє на матеріалі мішені. Цей параметр, відомий як тривалість імпульсу, впливає на процес поглинання, аналогічно довжині хвилі. Поглинання може бути як лінійним, так і нелінійним, і в кожному з випадків воно відбувається в режимах, відповідно, наносекундного та фемтосекундного часу (рис. 1.9).



- а) схема для порівняння впливу тривалості імпульсу на цільову поверхню;  
 б) передача енергії електронів на різній глибині.

Рисунок 1.9 – Вплив тривалості імпульсу на цілісність поверхні

На рисунку ударні хвилі показані синіми пунктирними лініями. Менша тривалість імпульсу показує витіснення матеріалу

Використання імпульсів тривалістю в пікосекунди дозволяє зменшити товщину зони термічного впливу (ЗТВ) на 90 % у порівнянні з мікросекундними імпульсами. Цікаво, що в пікосекундному діапазоні також спостерігається ЗТВ, що свідчить про те, що фактори, такі як тип газу, енергія імпульсу та флюенс, впливають на розмір ЗТВ. Низький рівень графітизації в мікросекундному режимі пояснюється тривалим нагріванням лазера, що призводить до розсіювання тепла і заважає локальному підвищенню температури, необхідному для швидкого фазового переходу з алмазу в графіт. Максимальна температура змінюється в наносекундному діапазоні; використання більш тривалих імпульсів може негативно вплинути на матеріал, викликавши плавлення та утворення смуг. При застосуванні імпульсів тривалістю менше пікосекунди ризик термічно індукованих фазових перетворень значно знижується, хоча низький рівень графітизації все ще може виникати через зони перегріву (рис. 1.10).

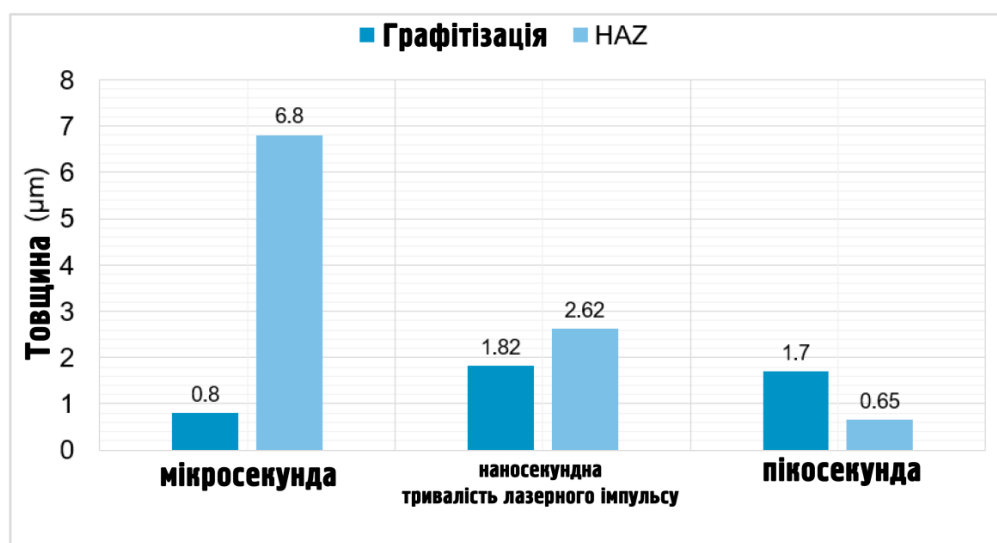


Рисунок 1.10 – Вплив тривалості імпульсу на тепловий перехід при лазерній обробці PCD

Для досягнення чистих текстур на поверхні необхідно забезпечити оптимальні швидкості абляції матеріалу. У надтвердих матеріалах флюенс, близький до порогового значення, проявляється з низькою швидкістю видалення, що коливається від 1 нм до 30 нм на імпульс. Основним механізмом знищення

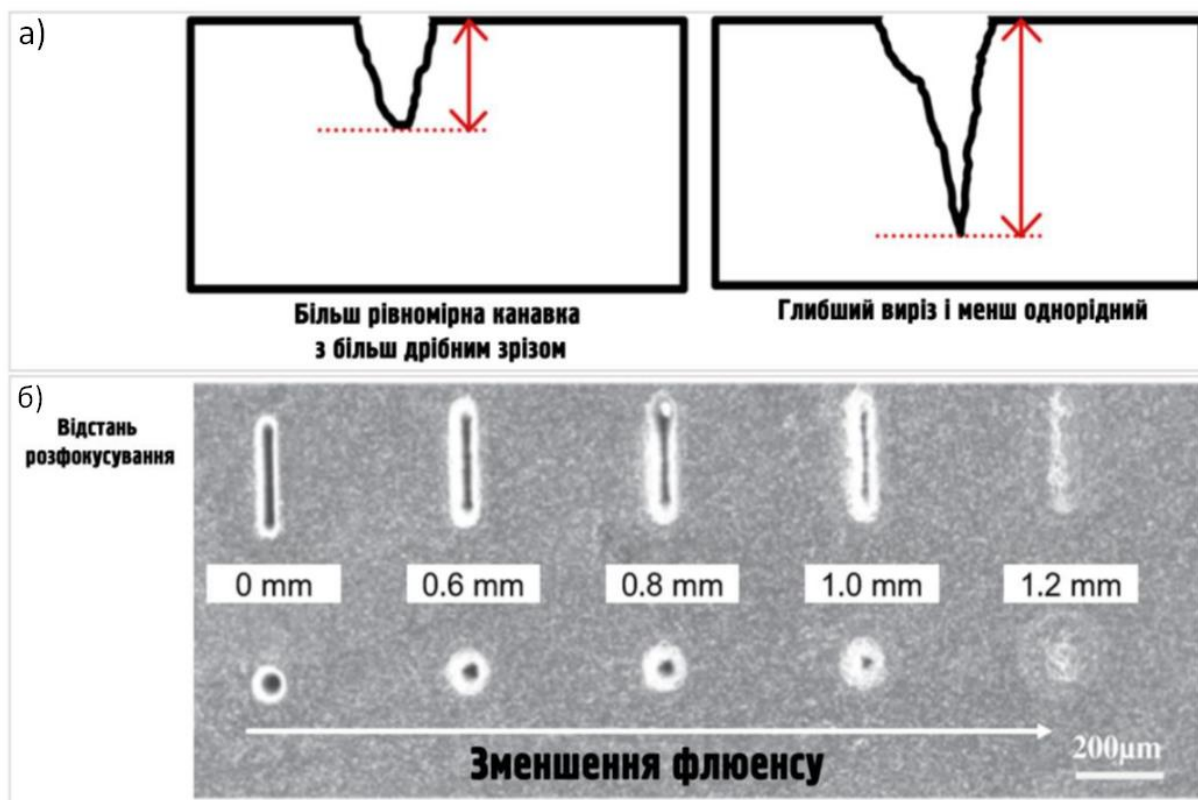
матеріалу є явище кулонівського вибуху, при якому значна теплова енергія сприяє руйнуванню іонів у решітці, що веде до знищення матеріалу. Оброблені поверхні часто виходять дуже гладкими, але з дрібнішими характеристиками, тому лазер повинен проходити по одній і тій же ділянці кілька разів.

Дослідження потоків, які значно перевищують порогове значення, вказали на те, що вони викликають фазовий вибух через перегрів рідин, що призводить до швидкості видалення матеріалу приблизно 100 нм за імпульс. Як наслідок, вищий флюенс дозволяє досягати більш глибоких деталей при меншій кількості проходів, що є ефективним рішенням. Однак це може призвести до проблеми, коли поверхня стає більш шорсткою. Нерівномірні специфічні характеристики профілю і текстури суттєво впливають на поведінку, відхиляючись від запланованої продуктивності.

Дослідження науковців продемонструвало, що оптимізація щільності з використанням волоконного лазера на інструментах із PCD сприяє утворенню ямок та лінійних канавок. У рамках цього дослідження була проведена оцінка відстані розфокусування для зміни щільності. Виявлено, що зі зменшенням флюенсу глибина канавок також зменшується, а обсяг видаленого матеріалу стає значно меншим (рис. 1.11).

Швидкість сканування дозволяє визначити, скільки часу деталь піддається впливу лазерного променя на конкретній ділянці. Для забезпечення рівномірного видалення матеріалу з мінімальними ушкодженнями необхідно оптимізувати параметри, враховуючи характеристики матеріалу та лазерного променя, щоб забезпечити ефективне транспортування енергії.

У сучасних технологіях обробки матеріалів, таких як PCD і PCBN, використовують швидкість подачі в межах від 2 мм/с до 900 мм/с.



- а) менша щільність потоку порівняно з більшою щільністю;  
 б) вплив відстані розфокусування (флюенсу) на PCD на мікротекстуру.

Рисунок 1.11 – Оцінка відстані розфокусування для зміни щільності

При максимальній швидкості лазер лише поверхнево проникає в матеріал, але при цьому передає достатню кількість енергії, щоб викликати розбризування матеріалу вздовж текстури. Зменшення швидкості покращує форму канавок, роблячи їх чіткішими та якіснішими [4].

## 2 ФІЗИЧНІ ЯВИЩА ТА ТЕОРИТИЧНІ КОНЦЕПЦІЇ

### 2.1 Теплові ефекти потужного лазерного пучка

Поширення Гауссового пучка без урахування теплових ефектів.

Звернувшись до лазерних пучків із різним інтенсивним профілем, було встановлено, що пучок із Гауссовим профілем забезпечує найвищу концентрацію:

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (2.1)$$

де  $I_0$  – інтенсивність у центрі гауссового розподілу;

$r_0$  – радіус розподілу.

Таку закономірність можна пояснити за допомогою квантової механіки, оскільки, згідно з її принципами, хвильовий пакет із Гауссовим профілем має мінімальну невизначеність. Якщо не враховувати тепловиділення в середовищі через поглинання лазерного випромінювання, то під час поширення безперервного лазерного пучка з Гауссовим профілем інтенсивності форма розподілу залишиться незмінною, але його радіус буде поступово збільшуватись пропорційно відстані. Водночас осьова інтенсивність зменшиться через поперечне розсіювання енергії пучка та процес поглинання.

Щоб домогтися самої високої спрямованості лазерного пучка, потрібно узгодити параметри коліматора з параметрами лазерного резонатора.

Для досягнення максимальної спрямованості лазерного пучка необхідно узгодити параметри коліматора з характеристиками лазерного резонатора.

Теоретична модель.

Розглянемо теоретичну модель для опису теплового ефекту. Було передбачено, що потужний лазерний промінь поширюється вздовж осі  $z$  каналу.

У параксіальному наближенні хвильове рівняння Максвелла набуває наступного вигляду:

$$2ik\frac{\partial E}{\partial z} = \nabla_{\perp}^2 E + k^2\left(\frac{n^2}{n_0^2} - 1\right)E, \quad (2.2)$$

де  $E$  – огибаюча електричного поля, а хвильове число, має зв'язок з довжиною хвилі  $k = 2\pi/\lambda$ ;

$\nabla_{\perp}^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2$  – трансверсальний оператор Лапласа;

$n$  – показник заломлення після збурення;

$n_0$  – показник заломлення до збурення.

$E^n$  є фінальним розв'язком першого рівняння на  $z = z^n$ , тоді розв'язок при  $z = z^{n+1}$  буде мати вигляд:

$$E^{n+1} = \exp\left(-\frac{i}{4k}\nabla_z\nabla_{\perp}^2\right)\exp\left[-\frac{ik}{2}\int_{z^n}^{z^{n+1}}\left(\frac{n^2}{n_0^2}-1\right)dz\right]\exp\left(-\frac{i}{4k}\nabla_z\nabla_{\perp}^2\right)E^n. \quad (2.3)$$

Це рівняння показує, що при проходженні відстані  $\Delta z$  відбувається поширення поля вакууму на певну довжину, а приріст фази на  $\Delta z/2$  вказує на зміну, яка відповідно до властивостей нелінійного середовища змінюється під час подальшого поширення поля. Як відомо, початковий сигнал лазера має гауссівський розподіл, що дозволяє лазерному променю функціонувати безперервно. Пропускаючи лазерний промінь через систему, можна представити розширювач пучка – коліматор, що розподіляє оптичне поле на площині при  $z = 0$ , у такому вигляді:

$$E(x, y, z = 0) = \sqrt{\frac{2P}{\pi\omega_0^2}}\exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right), \quad (2.4)$$

де  $P$  – потужність лазера;

$\omega_0$  – відповідає за радіус перетяжки променя.

Інтенсивність лазерного променя, який таким чином поширюється в газовому середовищі, можна виразити наступним чином:

$$I = |E|^2 \exp(-a_1 z), \quad (2.5)$$

де  $a_1$  – коефіцієнт поглинання газового середовища.

Якщо розглянути гідродинамічне рівняння в умовах ізобарної рівноваги, які описують зміни густини газу з часом у задачі термічного блюмінгу, воно може бути записане так:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho_1 = -\frac{(r-1)}{c_s^2} (a_1 I + Q_1), \quad (2.6)$$

де  $C_s$  – швидкість звуку;

$\gamma$  – коефіцієнт питомої теплот;

$\rho_1$  – зміна густини газу;

$Q_1$  – кількість тепла, що передається одиницею об'єму газу на одиницю часу від дзеркала.

Зв'язок між густиною газу та флуктуаціями показника заломлення може бути представленим цим структурним рівнянням:

$$\frac{n - n_0}{n_0 - 1} = \frac{\rho_1}{\rho_0}, \quad (2.7)$$

де  $\rho_0$  – густина газу без збурень.

Якщо поширювати лазер в каналі, то трапиться зміна показника заломлення газу за допомогою пошуку змінної його щільності.

Вибравши певний момент часу  $t$  маркуємо показник заломлення газу поперечного перерізу при  $z = z_1$  буде  $n_1$ , а показник заломлення газу поперечного перерізу при  $z = z_1 + \Delta_z$  буде  $n_2$ .

В той час, коли  $\Delta_z$  має відносно малі значення, різниця фаз  $\Delta\phi_1$ , між двома поперечними перерізами можливо виразити так:

$$\Delta\phi_1 = k \int_{z_1}^{z_1 + \Delta z} \Delta n dz \approx k \left( \frac{n_1 + n_2}{2} - n_0 \right) \Delta z. \quad (2.8)$$

Коли лазерний промінь проходить крізь газове середовище, на поверхні дзеркала формується розподіл інтенсивності, позначений як  $I_1$ . На рисунку 2.1 показано структуру і граничні умови дзеркала. Зазначимо, що воно складається з тонкої золотої плівки та монокристалічної кремнієвої підкладки, при цьому газове середовище впливає на поверхню плівки. Інтерфейс між золотою плівкою і газом позначений як  $S_1$ , тоді як межу між золотою плівкою і кремнієвою підкладкою позначено  $S_2$ ; інші поверхні, за винятком  $S_2$ , вважаються адіабатичними.

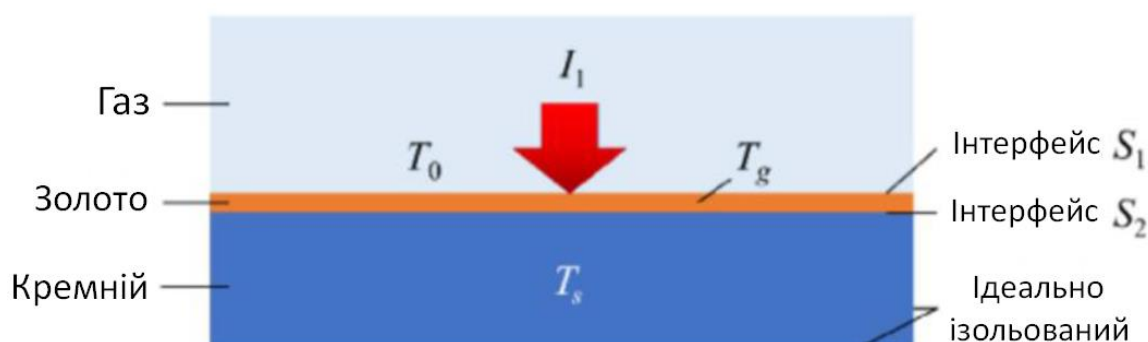


Рисунок 2.1 – Будова і граничні умови дзеркала

Температура дзеркала змінюється пропорційно до поглинання частини лазерної енергії. У момент часу  $t$ ,  $T_0$  позначає температурне поле газу поблизу золотої плівки,  $T_g$  – температурне поле золотої плівки, а  $T_s$  – температурне поле кремнієвої підкладки. Зазвичай для спрощення моделі розрахунків ігнорують розсіювання на золотій плівці. Оскільки золота плівка має високий коефіцієнт поглинання, вона здатна приймати майже всю енергію, яку поглинає дзеркало, і передавати тепло в газове середовище. Якщо вважати, що плівка золота дуже тонка, то температура на межі розділу  $S_2$  приймається рівною  $T_g$ , температурі золотої плівки.

Енергія, яку поглинає золота плівка, підвищує її температуру, що в свою чергу викликає значну термічну деформацію кремнієвої підкладки через

теплопровідність. Припускаючи, що монокристалічна кремнієва підкладка і золота плівка є ізотропними, а їхні теплофізичні параметри залишаються постійними [5].

## 2.2 Роль теплової лінзи

Утворення каналу з радіальним температурним градієнтом і підвищеною температурою, спричиненою проходженням інтенсивного лазерного променя через середовище, яке частково поглинає енергію, безпосередньо пов'язане з концентрацією енергії в зоні центральної осі пучка. Через сильніше нагрівання вздовж центральної осі каналу, у порівнянні з периферійними областями, показник заломлення значно зменшується для більшості середовищ ( $dn/dT < 0$ ). Однак для окремих матеріалів, таких як кварцове скло, вода, кремній, відбувається збільшення осьового показника заломлення ( $dn/dT > 0$ ). У результаті формується тепла "лінза", яка може по-різному діяти в обох випадках – або розсіюючи, або фокусує лазерний промінь. На рисунку 2.2 зображено, як змінюється процес лазерного нагрівання матеріалу залежно від глибини та часу [6].

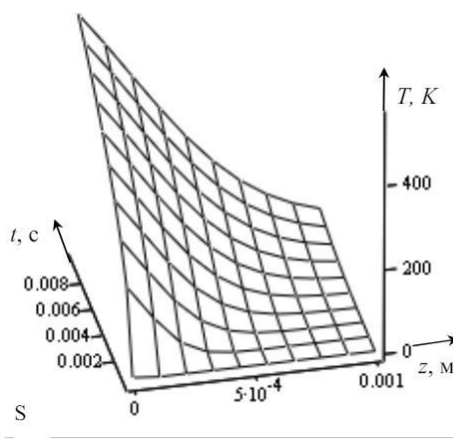


Рисунок 2.2 – Залежність лазерного нагрівання матеріалу від глибини та часу

Для знаходження значення середньої інтенсивності випромінювання використаємо формулу:

$$I = \frac{4P}{\pi d_0^2}. \quad (2.9)$$

### 2.3 Локальне нагрівання сильно поглинального матеріалу лазерним випромінюванням

Для визначення діаметра фокальної плями необхідно використати рівняння, яке пов'язує фокусну відстань лінзи або об'єктива  $f$  з певним кутом розбіжності лазерного пучка  $\theta$ . Отримане рівняння має вигляд:

$$d_f = f\theta. \quad (2.10)$$

Якщо використовується об'єктив, що складається з кількох лінз, він частково компенсує хроматичні й геометричні аберації, завдяки чому фокусується на випромінюванні точніше, ніж звичайна лінза (рис. 2.3).

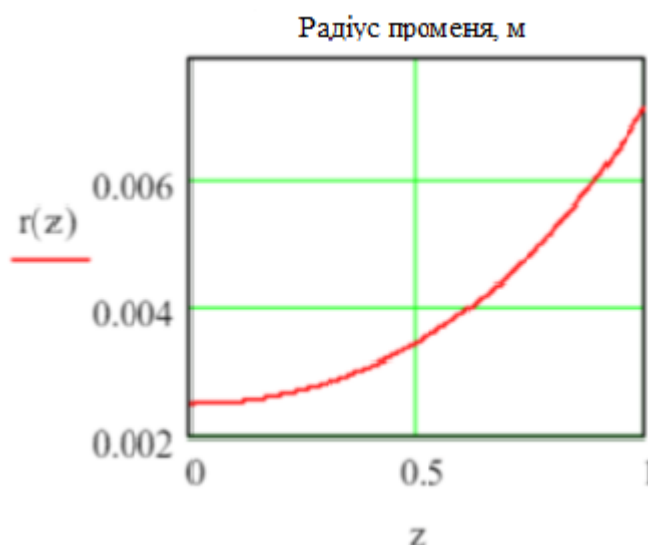


Рисунок 2.3 – Залежність радіуса пучка потужного лазера від шляху в атмосфері

Коли паралельний Гауссівський пучок падає на об'єктив з діаметром  $d_0$  і довжиною хвилі  $\lambda$ , його можна сфокусувати у фокальну пляму з діаметром:

$$d_f = \frac{4\lambda f}{\pi d_0}. \quad (2.11)$$

Для досягнення мінімального діаметра лазерної плями на об'єкті необхідно, щоб усі параметри оптичної системи фокусування були точно налаштовані під параметри лазерного резонатора. Щоб описати процес теплопоширення в однорідному матеріалі з ізотропними властивостями та температуро незалежним коефіцієнтом температуропровідності,  $kt$  записується у вигляді диференціального рівняння [6]:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{k_T} \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2.12)$$

## 2.4 Оптичні параметри атмосфери

Коефіцієнт екстинкції та коефіцієнт заломлення повітря, які безпосередньо залежать від температури та загального атмосферного тиску, включаючи тиск водяної пари, є двома основними характеристиками атмосфери. За умов, коли концентрація  $\text{CO}_2$  у повітрі не перевищує межу 0,03 %, коефіцієнт заломлення повітря для випромінювання з довжиною хвилі  $\lambda = 633$  нм можна визначити за такою формулою:

$$n_0 = 1 + \frac{(n_{air} + 1)p}{720,775} \left[ 1 + \frac{(0,817 - 0,0133T)10^{-6}p}{1 + 0,0362T} \right] - 5,6079 \times 10^{-8} \rho_{var}. \quad (2.13)$$

В обох випадках тиск виражається в міліметрах ртутного стовпа, а температура – в градусах за Цельсієм. Показник заломлення дуже сухого повітря при такій довжині хвилі становить  $n_{air} = 1,0002765$ . Якщо розглядати повітря як діелектрик, то зв'язок швидкості  $V$  у середовищі з діелектричною та магнітною проникністю  $\epsilon$  і  $\mu$  можна виразити через співвідношення Максвелла:  $c = V\sqrt{\epsilon\mu}$ , де  $c$  – це швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі. Цікаво, що для більшості

діелектриків  $\mu$  дорівнює одиниці, і це створює помилкове враження, що показник заломлення і діелектричну проникність можна пов'язати за формулою  $n = \sqrt{\epsilon}$ .

Однак у цьому випадку ця формула недійсна, оскільки вона застосовується лише для певних газів, та й то лише для довжин хвиль, що далекі від ліній поглинання таких газів, як водень, гелій чи азот. У межах області поглинання виникає інтенсивна дисперсія світла, зумовлена резонансною взаємодією іонів та електронів речовини з електромагнітною хвилею певної частоти  $\omega_0$ . Заряди, які осцилюють у полі цієї хвилі, демонструють властивості гармонічних осциляторів, а прискорення їхнього руху може спричинити утворення вторинних електромагнітних хвиль, які своєю сукупною дією впливають на явища заломлення та відбиття світла.

У багатьох випадках це враховується за допомогою формули Лоренца–Лоренца:

$$\frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} = \frac{4\pi e^2 F_{osc}}{3m(\omega_0 - \omega^2)} N_0, \quad (2.14)$$

де  $e$  – заряд електрона;

$F_{osc}$  – сила осцилятора, що пропорційна ймовірності переходу атома з одного енергетичного рівня  $E_m$  на інший рівень  $E_n$ .

Це відбувається при поглинанні фотона, якщо  $E_m < E_n$ , або ж при випромінюванні фотона, якщо  $E_m > E_n$ , коли електрон осцилює;

$m$  – відповідає масі електронів або іонів залежно від умов;

$\omega$  – кутова частота випромінювання;

$N_0$  – концентрація атомів.

Власна частота осцилятора  $\omega_0$ , що дорівнює  $em$ , відповідає частоті лінії поглинання: у першому випадку вона належить до видимого та ультрафіолетового діапазону, а в другому – до інфрачервоного [7].

Величину поглинання  $\kappa$ , яка представляє коефіцієнт поглинання, показано на рисунку 2.4.

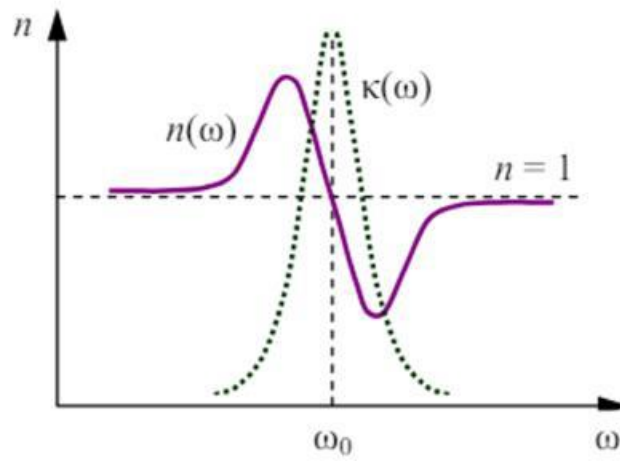


Рисунок 2.4 – Крива дисперсії  $n(\omega)$  та крива поглинання  $\kappa(\omega)$  світла у речовині

## 3 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ В COMSOLMULTIPHYSICS

### 3.1 Огляд програмного забезпечення

COMSOL Multiphysics – це потужний інструмент для чисельного моделювання та симуляцій у галузі фізичних і хімічних процесів, який широко використовується інженерами та науковцями для вирішення складних завдань у різних сферах. Програма дозволяє створювати детальні моделі, що охоплюють багато фізичних явищ, таких як теплопередача і механічні процеси. З її допомогою можна проводити моделювання параметрів поверхневої обробки матеріалів, що суттєво розширює можливості аналізу та досліджень.

До ключових функцій COMSOL Multiphysics належать:

- моделювання мультифізичних явищ: програма дозволяє будувати складні системи, де взаємодіють різні фізичні поля – електромагнітні, теплові потоки, механічні напруження та інші;

- різноманітність модулів: COMSOL Multiphysics містить багато модулів для моделювання різних фізичних процесів – від термодинамічних явищ до біохімічних реакції;

- гнучкість і можливість налаштування: зручний інтерфейс і підтримка програмування дозволяють користувачам налаштовувати моделі під свої потреби та додавати власні функції;

- візуалізація та аналіз результатів: набір інструментів для аналізу та візуалізації спрощує обробку даних і дає змогу користувачам отримувати якісні результати моделювання.

Переваги використання COMSOL Multiphysics:

- економія часу та коштів: COMSOL Multiphysics дає змогу проводити детальне моделювання складних систем без необхідності створення лабораторних умов. Це значно скорочує тривалість досліджень і знижує їхню вартість;

- висока точність і надійність: завдяки регулярним оновленням, програмне забезпечення забезпечує доступ до передових чисельних методів. Це дозволяє

проводити експерименти з максимальною точністю та отримувати достовірні результати;

– підтримка у прийнятті рішень: результати, отримані за допомогою COMSOL Multiphysics, стають основою для вирішення складних наукових та інженерних завдань, сприяючи оптимізації процесів і прийняттю обґрунтованих рішень.

Сфери застосування цього програмного забезпечення надзвичайно широкі. Воно успішно використовується для проектування електронних компонентів, аналізу механічних і біохімічних напружень, а також для симуляції хімічних реакцій, що підкреслює його універсальність і важливість у сучасних дослідженнях [8].

### 3.2 Створення програми для симуляції обробки матеріалів

Основне завдання програми полягає в моделюванні обробки різних груп матеріалів (табл. 3.1). У рамках дослідження було обрано дві групи простих речовин – метали та неметали. До металів віднесено сталь ШХ15-Ш, яку широко застосовують для виготовлення надміцних конструкційних деталей. Вона виробляється шляхом електрошлакового переплаву в кислих мартенівських печах.

Групу неметалів представляє органічне скло, а саме синтетичний твердий матеріал, отриманий на основі органічних полімерів.

Таблиця 3.1 – Фізичні властивості матеріалів

Властивості	ОРГСКЛО	ШХ15-Ш
Відбивна здатність	0,85	0,8
Щільність	1100 кг/м <sup>2</sup>	7800 кг/м <sup>2</sup>
Теплоємність	1270 Дж/(кг·К)	460 Дж/(кг·К)
Теплопровідність	0,3Вт/м·К	40 Вт/м·К

Коли лазерний промінь потрапляє на поверхню матеріалу, частина його енергії відбивається, а інша частина поглинається. Відомо, що відбивна здатність металів зменшується зі скороченням довжини хвилі випромінювання, що, у свою

чергу, підвищує ефективність нагрівання при використанні лазера з коротшою довжиною хвилі (рис. 3.1).

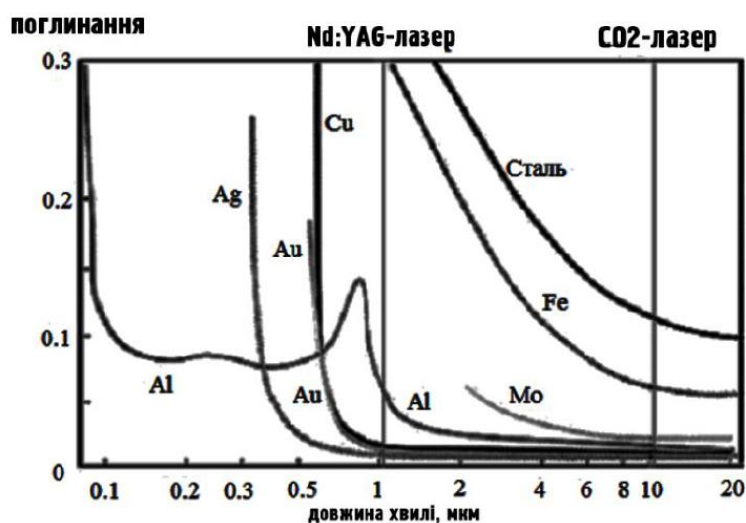


Рисунок 3.1 – Коефіцієнт поглинання металів

Для органічного скла при довжині хвилі 10,6 мкм коефіцієнт пропускання практично дорівнює нулю. Завдяки цьому лазерна хвиля може моделюватися як джерело тепла з Гауссівським розподілом. Враховуючи ці властивості, для моделювання обробки сталі ШХ15-Ш був обраний Nd:YAG-лазер, а для акрилового скла – CO<sub>2</sub>-лазер. Обидва пристрої працюють на середній потужності до 100 Вт [8].

В таблиці 3.2 приведені характеристики для режимів лазерної обробки. На рисунку 3.2 показаний коефіцієнт пропускання для неметалів.

Таблиця 3.2 – Характеристики для режимів лазерної обробки

	Потужність	Швидкість переміщення	Довжина хвилі	Діаметр плями
Оргскло	10	40	10,6	0,8 – 1
ШХ15-Ш	10	40	1,06	0,8 – 1

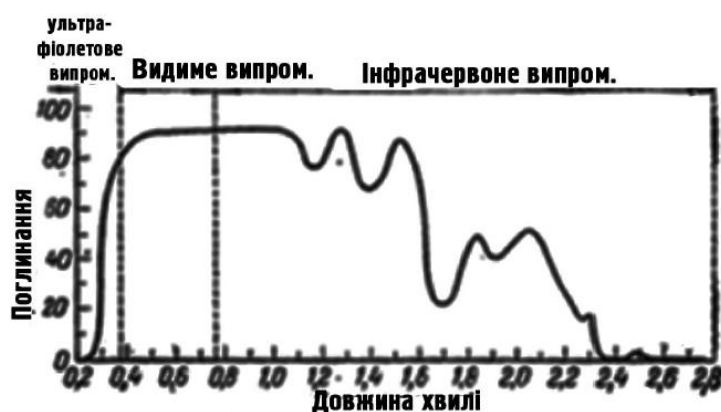


Рисунок 3.2 – Коефіцієнт пропускання для неметалів

### 3.3 Моделювання параметрів поверхневої обробки органічного скла

Для створення моделі використовуватимемо тривимірне моделювання, оскільки воно краще підходить для вирішення поставленої задачі, ніж точкове. Щоб промінь лазера був розпізнаний моделлю як поверхневе джерело тепла, використовується фізичний модуль для теплопередачі «Heat Transfer», а для передачі тепла у твердотільних матеріалах задіяний вузол «Heat Transfer in Solids». Для відображення зміни температури у часі обраний режим «Time Dependent», оскільки рух лазерного променя по об'єкту триває певний час, і важливо враховувати геометричні параметри зразка (рис. 3.3).

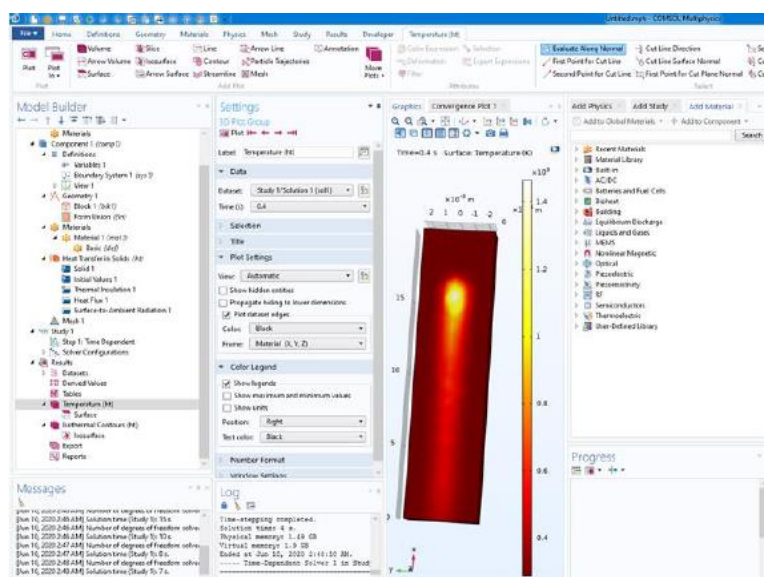


Рисунок 3.3 – Графік температурного розподілу на поверхні ( $t = 0,4$  с)

Ізотермічні контури для наочності отриманих результатів представлено на рисунку 3.4.

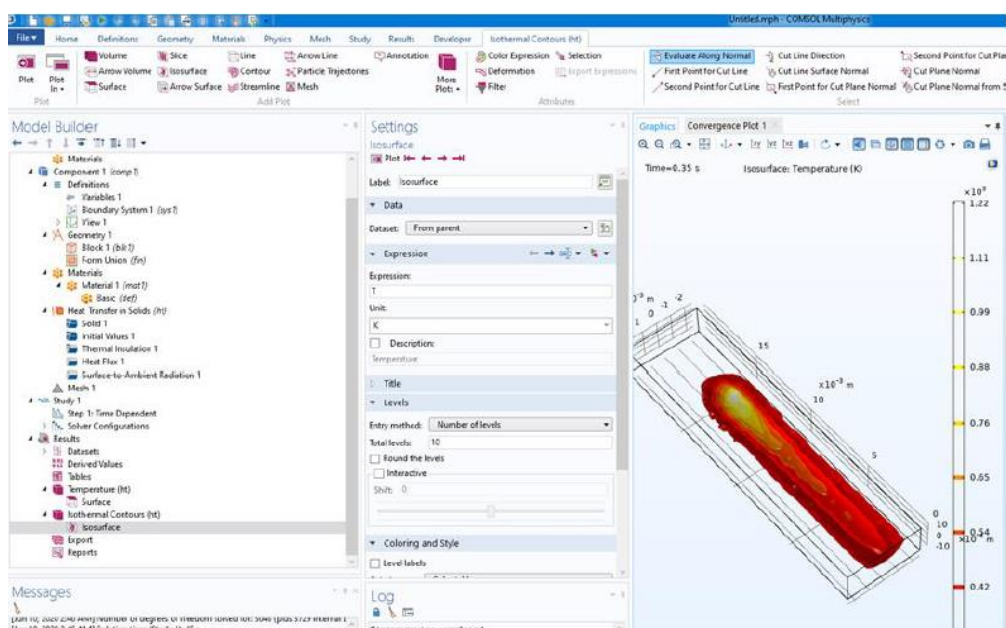


Рисунок 3.4 – Контурний графік ізотерм температури ( $t = 0,35$  с)

На наведених зображеннях демонструються температурні зміни на поверхні матеріалу та рух лазерного променя протягом усього процесу обробки. Всі графіки синхронізовані з часом, що дозволяє точно відслідковувати динаміку процесу.

Ізотермічний графік використовується для визначення глибини гравіювання матеріалу. У розділі “Definitions” вкладки “Component one” додаємо зонд, який дозволяє отримувати точні значення параметрів. Цей зонд автоматично зчитує дані, додає їх у таблицю та формує графіки на їх основі. Вибираючи в підрозділі “Probes” зонд “Boundary Probe”, ми додаємо його до основної змінної моделі. Для коректної роботи вимикаємо всі виділені площини, залишаючи лише основну, і змінюємо тип зонду на "максимум". Це дає змогу охопити всю поверхню матеріалу та визначити середнє значення температури на кожному етапі (рис. 3.3).

Для створення таблиць, у яких відображаються дані про температуру і час, запускаємо зондування за допомогою функції оновлення результатів (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Значення розраховані зондом

Час	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Температура	293	1409	1118	1273	1479	1247	1263

Розрахунки показують, що температура перевищує поріг абляції органічного скла. Це свідчить, що за умови відтворення моделювання в реальних умовах лазер зможе здійснити гравіювання скла (рис. 3.5) [7].



Рисунок 3.5 – Гравіювання оргскла, здійснене за заданими параметрами

#### 3.4 Моделювання параметрів поверхневого зміцнення ШХ15-Ш

Коли інтенсивний лазерний потік спрямовується на невелику ділянку поверхні матеріалу, відбувається поглинання енергії в приповерхневих шарах. Це призводить до швидкого нагрівання цих областей до надвисоких температур, що є основою процесу, відомого як лазерне термічне зміцнення.

Після завершення впливу лазерного випромінювання нагріта ділянка швидко охолоджується завдяки теплопровідності матеріалу. У результаті циклів нагрівання та охолодження відбуваються фазові перетворення. Якщо матеріал піддається зміцненню, такі зміни класифікуються як процеси зміцнення, що виникають під час фазових переходів (рис. 3.6).

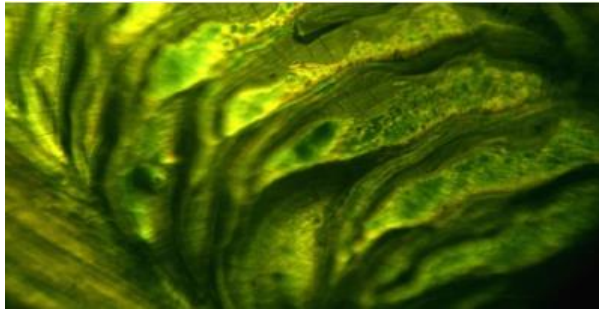


Рисунок 3.6 – Сталь ШХ15-Ш (0,2 мс)

Принцип лазерного зміцнення сталі базується на формуванні мартенситних структур у матеріалі. Хоча температура плавлення сталі зазвичай становить від 1300 °С до 1500 °С, результати моделювання процесів лазерного нагрівання показують, що за заданих параметрів температура на поверхні матеріалу досягає 1950 °С вже через 0,1 мс. Загартування зі стану розплаву забезпечує максимально можливе зміцнення (рис. 3.7).

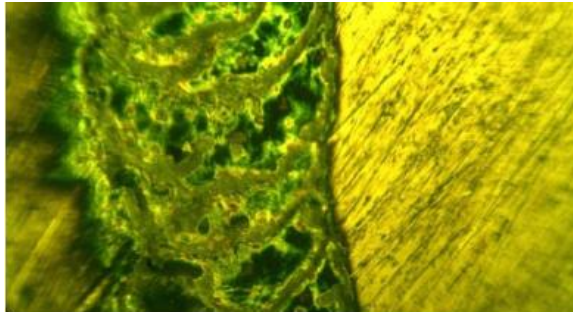


Рисунок 3.7 – Сталь ШХ15-Ш (0,4 мс)

Зі збільшенням тривалості імпульсу щільність потужності зростає. Під час обробки одиничними імпульсами тривалістю 0,2 мс відбувається не лише плавлення, але й "вспінення" металу. У разі використання імпульсів тривалістю 0,4 мс на поверхні після кристалізації з'являються мікро тріщини. Якщо ж тривалість імпульсу зменшити до 10 мс, процес плавлення сприяє досягненню більш високої якості обробленої поверхні (рис. 3.8).

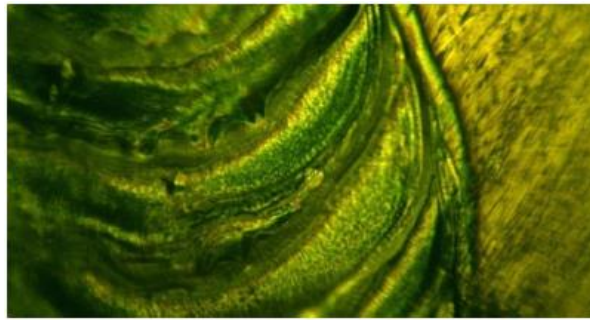


Рисунок 3.8 – Сталь ШХ15-Ш (10 мс)

Залежність мікротвердості матеріалу від тривалості лазерного імпульсу має виражений нелінійний характер (рис. 3.9).

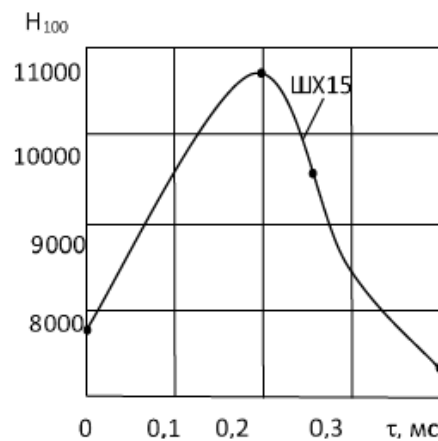


Рисунок 3.9 – Залежність мікротвердості сталі ШХ15 від тривалості імпульсу

Серед усіх досліджуваних зразків лазерне зміцнення демонструє найвищі показники мікротвердості. Максимальне значення досягається при тривалості імпульсу 0,2 мс. Щоб уникнути небажаного розплавлення поверхні під час процесу гартування, необхідно уважно підбирати частоту повторення імпульсів і зменшувати їх тривалість [7].

У дослідженні, проведеному О.С. Гнатенко, О.В. Афанасьєвої, Н.О. Лалазарова, Ю.С. Курського, Є. Одаренко, Ю. Сашкової, О. Іванченко [7], було детально проаналізовано основні аспекти нових технологій лазерного зміцнення деталей.

## ВИСНОВКИ

Обробка твердих і надтвердих матеріалів довела свою ефективність у сучасній інженерії поверхні та мікрообробці, відкриваючи широкі можливості для створення складних структур і високоточних поверхонь. Дослідження показали, що завдяки здатності лазера здійснювати локальний контрольований вплив можна досягати значних покращень у механічних і фізичних властивостях матеріалів, таких як твердість, зносостійкість і стійкість до корозії. Лазерне зміцнення, нанесення мікрорельєфу та створення спеціальних покриттів є критично важливими для галузей, де на перше місце виходять надійність та довговічність продукції.

Отримані результати підтверджують, що лазерна технологія має великий потенціал як інструмент для покращення якісних характеристик матеріалів, що сприятиме подальшому її впровадженню у виробничі процеси. Застосування лазерів не тільки розширює можливості обробки матеріалів, але й зменшує витрати на обробку за рахунок меншої потреби в додатковій механічній обробці та мінімізації зношування інструменту. Зважаючи на виявлені переваги лазерної обробки, можна впевнено стверджувати, що ця технологія продовжуватиме розвиватися, а її потенціал для створення високоякісних функціональних поверхонь буде зростати.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Черненко В.С., Кіндрачук М.В., Дудка О.І. Променеві методи обробки матеріалів: навч. посібник. Київ: Кондор, 2008. 166 с.
2. Пупань Л.І. Лазерні технології в машинобудуванні: навч. посібник. Харків: НТУ «ХП», 2020. 109 с.
3. Бобицький Я. В., Матвіїшин Г.Л. Лазерні технології. Ч.1. Львів: Львівська політехніка, 2020. 230с.
4. Кругляк І.В. Науково-технологічні засади формування зносокорозійностійких покриттів з використанням композиційних насичуючих середовищ: дис. ...докт. техн. наук. 05.02.01. Дніпровський державний технічний університет, 2021. 180 с.
5. Ткач О.П. Наноматеріали і нанотехнології в приладобудуванні: навчальний посібник. Сумський державний університет, 2014. 220 с.
6. Буркинський Б.В. Диференціальні рівняння та динамічні системи. *Звіт Національної академії наук України за 2013 рік*. 2013. 130 с.
7. Гнатенко О.С., Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Курський Ю.С., Одаренко Є.М., Сашкова Ю., Іванченко О. Нові технології лазерного зміцнення деталей паливної апаратури // Журнал нано- та електронної фізики. 2023. Т. 15 № 1. С. 01007-1-01007-7.
8. Кривець О.С. Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів для мікрообробки та інженерії поверхні. Суми: СумДУ, 2024. 62 с.