

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**Сумський державний університет**

Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра комп'ютеризованих систем управління

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Петро ЛЕОНТЬЄВ

(підпис)

червня 2024 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**на здобуття освітнього ступеня бакалавр**

зі спеціальності 153 – Мікро та наносистемна техніка освітньо-професійної програми «Нанотехнології та біомедичні системи»

на тему: «Моделювання параметрів лазерного випромінювання при обробці поверхні матеріалів»

здобувача групи ФЕ - 01 Петрушенко Нікити Миколайовича

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

Нікіта Петрушенко

(підпис)

Керівник,
доцент кафедри КСУ,
доцент, к.ф.-м.н. Кривець О.С.

(підпис)**Суми – 2024**

Сумський державний університет
Факультет електроніки та інформаційних технологій
Кафедра Комп'ютеризованих систем управління

«Затверджую»

Завідувач кафедри

Петро ЛЕОНТЬЄВ

(підпис)

ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавра

зі спеціальності 153 - Мікро та наносистемна техніка, освітньо-професійної програми

«Нанотехнології та біомедичні системи»

здобувача групи ФЕ-01 Петрушенко Нікити Миколайовича

1. Тема роботи: «Моделювання параметрів лазерного випромінювання при обробці поверхні матеріалів»

затверджую наказом по СумДУ від «27» березня 2024 р. № 0302-VI

2. Термін здачі здобувачем кваліфікаційної роботи до 05 червня 2024 року

3. Вхідні дані до кваліфікаційної роботи Параметри лазерного випромінювання, параметри матеріалу, умови обробки, цільові параметри, додаткові дані.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що їх належить розробити)

1) Опрацювання научних трудів на тему лазерної обробки матеріалів, мікрообробки та поверхневої інженерії для твердих і надтвердих матеріалів.

2) Огляд фізичних процесів та теоретичних моделей. 3) Вибір програмного забезпечення та подальше моделювання параметрів лазерного випромінювання при обробці поверхні матеріалів в ньому. 4) Аналіз результатів.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): «Анотація», «Фізичні принципи лазерної обробки матеріалів», «Вплив параметрів лазерного випромінювання», «Лазерне різання та зварювання», «Лазерне поверхневе зміцнення», «Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів», «Моделювання параметрів поверхневої обробки органічного скла», «Моделювання параметрів поверхневого зміцнення ШХ15-Ш».

6. Консультанти до проекту (роботи), із значенням розділів проекту, що стосується їх

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
розділи 1-4	Кривець О.С.	Кривець О.С.	Кривець О.С.

7. Дата видачі завдання «27» березня 2024 р.

Завдання прийняв до виконання _____

(підпис)

Керівник _____

(підпис)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання	Примітка
1	<i>Опрацювання научних трудів на тему лазерної обробки матеріалів, мікрообробки та поверхневої інженерії для твердих і надтвердих матерій</i>	06.05.24- 15.05.24	
2	<i>Огляд фізичних процесів та теоретичних моделей.</i>	15.05.24- 20.05.24	
3	<i>Вибір програмного забезпечення та подальше моделювання параметрів лазерного випромінювання при обробці поверхні матеріалів в ньому.</i>	20.05.24- 24.05.24	
4	<i>Аналіз отриманих результатів</i>	24.05.24- 25.05.24	
5	<i>Оформлення пояснювальної записки до кваліфікаційної роботи</i>	25.05.24- 31.05.24	

Здобувач вищої освіти

_____ (підпис)

Керівник

_____ (підпис)

АНОТАЦІЯ

Записка: 62стр., 25 рис.,5 табл.,39 використаних джерел.

Обґрунтування актуальності теми роботи – Тема кваліфікаційної роботи є актуальною, оскільки присвячена технологіям лазерної обробки матеріалів, що є важливою у багатьох напрямках науки та галузей промисловості, що пов'язані із машинобудуванням, медициною, космосом, електронікою, 3D принтингом та інш. Це дослідження має великий потенціал для вирішення багатьох проблем, з якими стикається людство. Його результати можуть допомогти у розробці нових джерел енергії, які є більш ефективними та екологічно чистими.

Об'єкт дослідження – оброблювальні поверхні різних матеріалів, у тому числі і надтвердим та твердим типам, оскільки саме вони використовуються у нанотехнологічних галузях та біомедицині.

Мета роботи – узагальнення інформації вітчизняних та закордонних досліджень для проведення аналізу з прогнозуванням подальшого розвитку обробки матеріалів шляхом лазерної обробки, проведення чисельних симуляцій із використанням спеціалізованих програмних продуктів, побудови графічних зображень на основі отриманих результатів.

Методи дослідження — використання теоретичних моделей та взаємодія з фізичними процесами, а саме застосування ефектів потужного лазерного пучка, теплової лінзи та оптичних параметрів атмосфери.

Результати—За допомогою програмного забезпечення COMSOL Multiphysics змодельовано параметри поверхневих процесів двох різних матеріалів та прикладено певні графічні та математичні результати симуляції. Зроблені певні висновки спираючись на отримані результати дослідження.

COMSOL MULTIPHYSICS, ЛАЗЕР, НАГРІВАННЯ, АБЛЯЦІЯ, МЕХАНІКА

ЗМІСТ

<u>ВСТУП</u>	9
<u>ІНСТРУКЦІЯ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ НА ЛАЗЕРНИХ УСТАНОВКАХ</u>	11
<u>1 ЛАЗЕРНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ. МІКРООБРОБКА ТА ПОВЕРХНЕВА ІНЖЕНЕРІЯ ДЛЯ ТВЕРДИХ І НАДТВЕРДИХ МАТЕРІЙ</u>	14
<u>1.1 Фізичні принципи лазерної обробки матеріалів</u>	14
<u>1.2 Лазерне поверхнєве зміцнення</u>	16
<u>1.3 Лазерне різання та зварювання</u>	21
<u>1.4 Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів</u>	23
<u>1.5 Виготовлення поверхневих текстур</u>	27
<u>1.6 Вплив довжини хвилі та типу лазера на механізм абляції</u>	29
<u>1.7 Вплив тривалості імпульсу на цілісність поверхні</u>	33
<u>2 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ</u>	37
<u>2.1 Теплові ефекти потужного лазерного пучка</u>	37
<u>2.2 Роль теплової лінзи</u>	43
<u>2.3 Локальне нагрівання сильно поглинального матеріалу лазерним випромінюванням</u>	44
<u>2.4 Оптичні параметри атмосфери</u>	45
<u>3 МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ В COMSOL MULTIPHYSICS</u>	48
<u>3.1 Огляд програмного забезпечення</u>	48
<u>3.2 Створення програми для симуляції обробки матеріалів</u>	49
<u>3.3 Моделювання параметрів поверхневої обробки органічного скла</u>	52
<u>3.4 Моделювання параметрів поверхневого зміцнення ШХ15-Ш</u>	54
<u>ВИСНОВКИ</u>	58
<u>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</u>	59

ВСТУП

Моделювання параметрів лазерного випромінювання при обробці поверхні матеріалів є дуже актуальною темою на сьогоднішній день. Нинішні промислові процеси мають бути високоточними, швидкими, надійними та ефективними. Лазерна обробка матеріалів представляє себе як один з найбільш сучасних та перспективних методів, який легко дозволяє подолати усі виклики та задовольнити будь яку вимогу у безлічі галузей. Моделювання параметрів лазерного випромінювання дає змогу зменшити виробничі витрати, оптимізувати процеси обробки, підвищити якість продукції та знизити кількість відходів. Це дуже єстотно в умовах зростаючої конкуренції та постійного розвитку технологій. Особливо важлива лазерна обробка матеріалів у розвитку нанотехнологій та біомедицини, оскільки вона є ключовою технологією у цих галузях. У нанотехнологіях лазер застосовується для точної нанофабрикації, завдяки чому створюються нанорозмірні структури з надвисокою точністю. Завдяки цьому стає можливим виробництво матеріалів з унікальними властивостями і нановимірних пристроїв. В свою чергу у біомедицині лазер використовують для діагностики та лікування різних захворювань, а також при високоточних хірургічних операціях з корекції зору, коагуляції кровоносних судин та при видаленні пухлин. Крім того, лазер використовуються при розробці біосенсорів, основною задачею який є виявлення унікальних біомолекул на нанорівнях.

Процес лазерної обробки поверхні матеріалів, а точніше вплив різних параметрів лазерного випромінювання на властивості та якість оброблюваних поверхонь є об'єктом дослідження дипломної роботи. Предметом дослідження є параметри лазерного випромінювання, зокрема потужність, тривалість імпульсу, частота повторення імпульсів, а також

їх вплив на результати обробки різних матеріалів. Гіпотеза дослідження доводить, що за допомогою комп'ютерного моделювання можливо досконало визначити оптимальні параметри лазерного випромінювання для обробки різноманітних матеріалів, що в свою чергу дозволить значно покращити якість обробки та ефективність виробничих процесів.

Запропонований підхід до моделювання параметрів лазерного випромінювання є інноваційним, оскільки він включає в себе використання сучасних програмних комплексів і методів комп'ютерного моделювання, що дозволяє підвищити точність і ефективність досліджень.

Це забезпечує можливість створення нових технологічних процесів, які можуть бути адаптовані до вимог конкретних галузей промисловості.

Дана робота складається з вступу, аналітичного огляду літератури, інструкції з охорони праці при роботі на лазерних установках, трьох розділів, опису програмного забезпечення для моделювання параметрів лазерного випромінювання при обробці поверхні матеріалів, вибору методу розв'язання поставленої задачі, висновків та списку використаних джерел.

ІНСТРУКЦІЯ З ОХОРОНИ ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ НА ЛАЗЕРНИХ УСТАНОВКАХ

1. Принцип роботи лазерів та їх безпечне використання в експлуатації

Лазер є пристроєм, що виконує функцію генерації когерентного електромагнітного випромінювання у видимому спектрі і інших діапазонах та включає в себе ультрафіолетове та інфрачервоне випромінювання. Він працює на базі принципу підсилення світла за допомогою стимулювання випромінювання атомів або молекул. При професійній роботі з лазерами необхідно завжди виконувати певні правила, та дотримуватися заходів безпеки для уникнення потенційних травм та небезпек. Будь-який лазер складається з трьох основних елементів у своїй конструкції:

- Активне середовище, що визначає довжину хвилі випромінюваного світла.
- Джерело енергії: електричний струм, імпульсна лампа або хімічна реакція, які стимулюють випромінювання світла.
- Оптичний резонаторна система, яка включає два дзеркала і створює резонаторну структуру для підсилення та відбиття світла в середині системи.

При роботі з лазерами, необхідно виконувати усі заходи безпеки. За Міждержавним стандартом ГОСТ 12.1.040-83 * («Система стандартів безпеки праці. Загальні положення лазерної безпеки») лазерні установки ділять на 4 класи безпеки:

- *Клас 1.* Безпечні для зору, не потрібні заходи безпеки. Оскільки абсолютна більшість лазерів ізольована від користувача, їх відносять до першого класу.
- *Клас 2.* Лазери наднизької потужності випромінювання називають видимими. Воно не є небезпечним навіть при потраплянні на сітківку

людського ока. Завдяки реакції відрази тривалістю в 0.25 секунд, людині не буде заподіяна ніяка шкода. Лазери другого класу мають низьку потужність променя на виході в 1 мілліватт. Отже, лазери другого класу відповідають нормативному ліміту експозиції в 0.25 секунд.

- *Клас 3.* На відстані 10 см від поверхні з дифузним відбиваючим принципом та при ураженні шкіри дзеркально відбитим чи прямим випромінюванням вихідне випромінювання несе небезпеку опромінюючи очі дифузним відбитим, прямим і дзеркально відбитим випромінюванням. Лазери третього класу є небезпечними для очей людини, бо за час реакції людина занадто повільна для обмеження експозиції сітківки на безпечний рівень. Може заподіяти шкоди іншим структурам очей, як рогівка та кришталік. Для шкіри та інших органів не є небезпечним.
- *Клас 3А.* Є небезпечними лише у випадку спостереження за їх випромінюванням через оптичні прилади, при короткому незахищеному зоровому контакті не шкодить оку.
- *Клас 3В.* Несуть пряму загрозу при неозброєному спостереженні на лазер чи його дзеркальне відображення. Зазвичай даний клас використовують у військових та дослідницьких цілях.
- *Клас 4.* Четвертий клас несе значну шкоду шкірі дифузним відбитим випромінюванням відстанню від 10 см від відбиваючої поверхні чи при розсіяному відображенні. Є потенційно пожежо-небезпечними, використовуються для різання та зварювання і відносяться до хірургічних та метало оброблювальних лазерів. Лазери які мають середню вихідну потужність більше 0.5 W також класифікуються як четвертий клас.

2. Загальні вимоги безпеки при роботі на лазерних установках

2.1. До роботи з лазерними пристроями допускаються лише повнолітні особи, які пройшли медичний огляд, інструктаж на робочому місці з ОКГ, мають як мінімум третю кваліфікаційну групу та склали іспити з ПТБ і ПТЕ з отриманням доступу до роботи.

2.2. Категорично забороняється залишати робоче місце без нагляду та порушувати правила внутрішнього розпорядку при роботі з лазерами.

2.3. Відповідна особа бере на себе відповідальність за технічний стан установки та устаткування. Під час роботи з лазером, у приміщенні має знаходитися щонайменше два працівники.

2.4. Комісія з ОП та ТБ приймає та оглядає утворені та придбані установки з ОКГ з подальшим наданням дозволу на їх експлуатацію.

2.5. Небезпечними факторами для життя до здоров'я робітника є лазерне випромінювання (будь-якого типу), світло вета ультрафіолетового випромінювання від кварцевих розрядних трубок та імпульсних ламп накачки, іонізуюче та ІК випромінювання з виділенням тепла від нагрітих поверхностей, висока напруга, електромагнітні поля ВЧ- і НВЧ-діапазону та токсичні сполуки, які використовуються в конструкції лазерних установок.

2.6. На робочому місці обов'язково мають знаходитися діелектричні перчатки та коврик біля щитка керування, захисні окуляри з відповідними фільтрами, заземлювачі, вуглекислий вогнегасник та укомплектована за стандартом аптечка.

РОЗДІЛ 1. ЛАЗЕРНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ. МІКРООБРОБКА ТА ПОВЕРХНЕВА ІНЖЕНЕРІЯ ДЛЯ ТВЕРДИХ І НАДТВЕРДИХ МАТЕРІЙ

1.1 Фізичні принципи лазерної обробки матеріалів

Лазери є дуже затребуваними у багатьох галузях науки, медицини та промисловості. Важко уявити собі якісну обробку матеріалів без використання лазерного обладнання. Світлова енергія у лазері розпочинає процес збудження в активному середовищі (газі, твердому тілі чи рідині), воно знаходиться поміж двох дзеркал або в резонаторі. Завдяки процесу збудження, атоми (або в деяких випадках молекули) активного середовища змушені випромінювати фотони [1]. Цей процес спричиняє появу світлової хвилі, яка нарощується між дзеркалами. Для того щоб утворювався лазерний промінь, одне з дзеркал має частково прозору структуру для того щоб частка світла мала можливість з нього вийти.

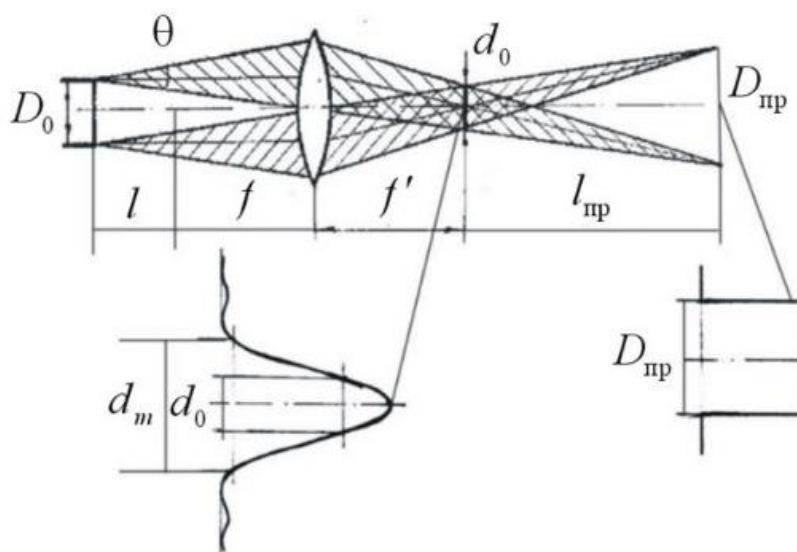


Рисунок 1 Телецентрична модель лазера спільно з оптичною системою [1]

Обробкою матеріалів з використанням лазера є контрольований заданими параметрами процес нагріву, де джерело енергії виступає лазерний промінь. Тепловий вплив випромінювання, в основі якого лежить принцип впливу на поверхню матерії, при якому частина радіації поглинається, а інша частина відбивається є фундаментом більшості технологій в яких використовують лазер. Дане співвідношення наперед має залежність від оптичних характеристик поверхні оброблюваного матеріалу. Енергія лазерного променя, що вибирає поверхню матеріалу, застосовується для його нагрівання. Воно може відбуватися без розплавлення поверхні матеріалу або з її розплавленням. Інколи трапляються випадки нагрівання, які навіть можуть стати причиною випаровування оброблюваного матеріалу. Значна частина типів лазерної обробки дуже давно знайшла своє використання в промисловості, але навіть зараз є новітні проекти, які знаходяться на стадії досліджень та випробовувань. Завдяки високій концентрації енергії, можливості оброблювати елементи будь-яких розмірів, відсутності необхідності у вакуумі, валотильності транспортування енергії та простоті автоматизації, лазерна обробка матеріалів стала одним з найефективніших та найуніверсальніших методів обробки на сьогоднішній день [2,3]. В останній час ми можемо спостерігати дуже високий інтерес до застосування лазерів для обробки матеріалів у США, Японії та багатьох інших промислово розвинутих країнах, які витрачають значні кошти з бюджету для вдосконалення та пошуку нових методів обробки поверхонь матеріалів лазерними установками.

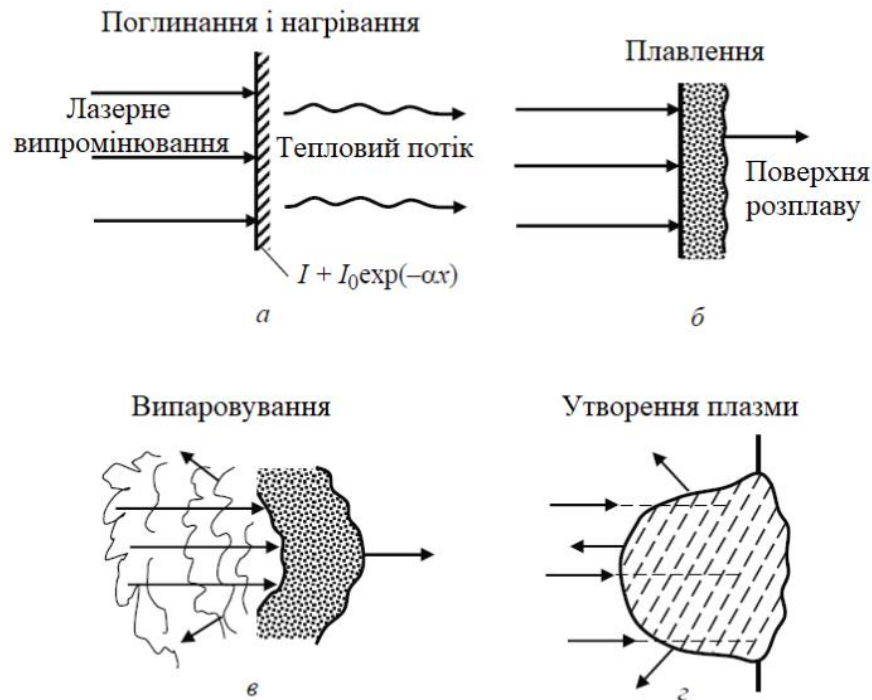


Рисунок 2 Основні фізичні процеси, що виникають при взаємодії[3]

1.2 Лазерне поверхневе зміцнення

Одним з найбільш популярних методів лазерної обробки металів та різноманітних сплавів є лазерне поверхневе зміцнення. Це прогресивний метод термообробки простих речовин, що відрізняється від традиційних методів, таких як електричне загартування, загартування з розплаву та насталування струмами високої частоти. На відміну від стандартних методів, лазерне загартування відрізняється тим, що воно не передбачає об'ємне нагрівання, а здійснюється локально, з поверхні обраної матерії.

Вид обробки	щільність потужності, 1 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
Лазерна 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

Таблиця1 Види поверхневої лазерної обробки[4]

Переваги лазерного поверхневого зміцнення перед другими методами:

Немає необхідності в охолоджуючих середовищах: Завдяки методу поверхневого зміцнення, процес стає більш безпечним та менш забруднює навколишнє середовище, Він дає значне спрощення технологічного процесу.

Висока локальна точність: Лазерний пучок забезпечує точне зміцнення самієї зони, яка потребує дослідження, бо ця методика дає змогу сфокусуватися на певній ділянці,

Глибоке та рівномірне зміцнення: Лазерне загартування досягає рівномірного та глибокого зміцнення поверхневого шару на всій ділянці оброблювального матеріалу. Це сильно покращує твердість, зносостійкість, та стійкість до корозії матеріалу.

Швидкість та гнучкість: Матеріали будь-якого розміру та будь-якої складної форм з високою гнучкістю та швидкістю можливо обробити поверхневим зміцненням.

Енергоефективність: Енергія розподіляється лише на оброблювальну ділянку, завдяки чому досягається максимальна енергоефективність.

Найперші дослідження впливу лазерного випромінювання на різноманітні матеріали, проведені ще в 60-х роках минулого століття, за результатами яких було зрозуміло, що це є дуже важливою інновацією у всіх сферах життєдіяльності. У біомедицині даний метод покращує біосуміність. Як приклад, при обробці поверхні титанових імплантів можливо створити мікро і наноструктури, які будуть сприяти швидшому приживленню імплантатів у кістковій тканині, окрім того створюючи антибактеріальні текстури, що заважають виникненню бактеріального заселення з подальшим ризиком інфекцій. Лазерне поверхнєве зміцнення дозволяє керувати властивостями матеріалів (наприклад змінювати їх оптичні, електричні та механічні властивості для розробки сенсорів чи фотонних компонентів) на мікро та нано-рівнях, що відкриває нескінченні можливості для створення високотехнологічних пристроїв та матеріалів у майбутньому. Технологія дозволить знайти нові способи покращення твердих якостей графену для збільшення терміну його експлуатації та покращення його фізичних властивостей, крім того з'явиться можливість модифікувати будь-яку поверхню з ідеальною точністю, що відкриває новий простір для створення нанотехнологічних пристроїв.

Теплові процеси лазерного поверхневого зміцнення

Головна характеристика теплового впливу є безпосередньо температура. При зростанні амплітуди теплових коливань кристалічної решітки матерії, відбувається процес нагрівання. Завдяки законам та механізмам теплопровідності відбувається перенесення тепла в твердотільних речовинах. Для напівпровідників з дуже великою концентрацією зарядів та

металів електронна теплопровідність є механізмом теплопровідності електронна теплопровідність, оскільки рух електронів у цих матеріалах відбувається вільно з перенесенням енергії в собі. Коли як в діелектричних та керамічних неметалах, через їх дуже низьку електропровідність, головним механізмом теплопровідності є решіткова теплопровідність. Транспортування тепла у неметалах відбувається завдяки коливанням атомів кристалічної решітки.

Лазерне нагрівання несе після себе зміни у оптичних та теплофізичних характеристиках матеріалу, крім того впливає на його теплове розширення і призводить до фазових переходів в твердому стані. Трапляються випадки, коли нагріваючи метал – активуються різні дифузійні процеси характерні для твердого тіла і незначні хімічні реакції на його приповерхневих та поверхневих шарах. Не дивлячись на те, що процес нагрівання матерії лазерним випромінюванням виконується звичайними та добре вивченими явищами, (на відміну від них) швидкість нагрівання, високі температурні швидкості та охолодження і великі температурні градієнти у просторі утворюють кожного разу персональні умови для лазерної обробки і призводять до сильних відмінностей у теплових процесах, до яких призводить вплив лазера [4].

При обробці матерії лазером, його оптичні характеристики сильно впливають на результат. Кількість та розподіл тепла, яке виділяється, безпосередньо залежать від того, які саме поглинальні здатності лазерного випромінювання має досліджуваний матеріал. Ці властивості, в свою чергу, змінюються під лазерним впливом, створюючи дуже складну систему зворотних зв'язків, яка має суттєвий вплив на процес. Простіше кажучи, лазер не просто гріє матеріал, а змінює його, а ці зміни, в свою чергу, мають вплив на те, як лазер взаємодіє з матеріалом. Цей динамічний процес є основою роботи лазерних технологій, який робить їх такими універсальними та потужними. На стадії нагріву матеріалів лазером, відбуваються основні технологічні операції для розуміння фізичної сутності, яку проходять без руйнування матеріалу,

наприклад: термообробка, зварювання, дифузія. Якщо дії лазерної обробки, пов'язані з руйнуванням та усуненням певної частини матеріалу, тоді аналіз цієї стадії допомагає знайти умови початку руйнування нагрівання і виступає як важлива попередня стадія. За законом Бугера можна описати процес поширення випромінювання в речовинах.

$$q(x) = q_0(1 - R)\exp(-ax)$$

де $q(x)$ – потужність випромінювання на відстані від нього, q_0 це щільність потужності падаючого випромінювання лазера, R коефіцієнт відбиття поверхні, a – індикатор ослаблення світла в речовині.

Матеріал нагрівається під час поглинання випромінювання, режимів його нагрівання існує два, такі як поверхневе та слабе поглинання випромінювання. Лазерне випромінювання з довжинами хвиль є основою для більшої частини технологічних процесів які проходять в спектральній області сильного поглинання матерії, бо це є засобом забезпечення ефективного використання енергії талocalного впливу. У металах напівпровідниках проходить сильне поглинання під час процесу "металізації" звикористанням сильного випромінювання у діелектриках та у напівпровідниках, в той час, де довжина хвилі випромінювання знаходиться в області їх фундаментального поглинання. Тоді глибина проникнення випромінювання буде значно менше, ніж звичний розмір теплопровідності.

$$\frac{1}{a} \ll \sqrt{at},$$

де a – температуропровідність матеріалу, а t є часом впливу випромінювання. При умовах потужного поглинання випромінювання, джерело тепла в матеріалі фокусується фактично на його поверхні. Якщо рівняння теплопровідності розв'язувати математично, це враховується завдяки граничним умовам на поверхні. Вирішуючи рівняння теплопровідності використовують математичні методи інтегральних перетворень Лапласа, метод розділу

змінних та метод джерел. Коли матеріал нагрівається його властивості оптики та теплофізики сильно видозмінюються, особливо це впливає на коефіцієнт відбиття. Важливо зазначити, що сильний вплив на процес нагрівання матеріалу бере на себе просторова і тимчасова структура випромінювання. Товщина шару, що пройшов процес нагрівання в матеріалі знаходиться завдяки його специфічним розмірам теплопровідності \sqrt{at} . Режими опромінення, які є факторами об'ємного поглинання лазерного випромінювання, $\frac{1}{a} > \sqrt{at}$ застосовують, коли треба створити в оброблюваному матеріалі об'ємне джерело тепла або прилокальній обробці його об'єму всередині. Теплопередача в матеріалі визначається факторами теплоємності і теплопровідності, які в свою чергу впливають на глибину і швидкість прогрівання матеріалу [5].

1.3 Лазерне різання та зварювання

Високоточний процес застосування зосередженого лазерного променя для поділу матеріалу на шукані компоненти називається лазерним різанням. Метод є дуже ефективним та універсальним, тому його використовують у багатьох галузях промисловості, завдяки чому люди зберігають багато часу. Принципом роботи є створення надтоної зони нагрівання або плавлення завдяки процесу фокусування лазерного променя на поверхні матеріалу, під дією енергії лазера матеріал починає проходити процес випаровування та розтоплення, завдяки чому стає можливою доскональною різати необхідного розміру форми та деталі з будь-яких матеріалів. На відміну від інших методів обробки, лазерне різання унікальним тим, що воно не має прямого контакту з матеріалом, завдяки чому майже відсутній знос інструментів для обробки та виконується дуже високоточність. Головним плюсом є опрацювання дуже складних форм та

забезпечення великої продуктивності виробництва шляхом виконання обробки на великій швидкості [6]. Лазерна пляма рухається вздовж поверхні матеріалу двома способами: повільно, якщо теплове насичення матеріалу виконається швидше, ніж пляма пройде шлях, який буде рівним своєму радіусу r_0 . При русі плями зі швидкістю V , її товщина r_0 вона пройде за час r_0/V , тоді, якщо $Vr_0/k_T \ll 1$ у центрі плями можна побачити максимальну температуру, яка буде більша за температуру матеріалу T_0 час теплового насичення r_0^2/k_T зразка розміром значно більшим ніж радіус плями, буде становити r_0^2/k_T на величину $T = \frac{r_0 I}{\lambda_T} \left(1 - \frac{r_0 v}{4k_T}\right)$, в такому випадку рух плями можна вважати повільним. Другий спосіб руху полягає в тому, що при виконанні умови $Vr_0/k_T \gg 1$ рух плями пройде швидко, і максимум температури буде зміщуватися до заднього краю плями, де у найбільш гарячій точці поверхні матеріалу температура буде вище ліміту T_0 на величину $T \approx \frac{1.6I}{\lambda_T} \sqrt{\frac{k_T r_0}{V}}$.

Лазерним зварюванням називають технологію, яка використовує лазерний промінь з метою об'єднати від двох до більшого значення матеріалів, за допомогою процесів розплавлення чи розтоплення їх поверхонь для з'єднання. Лазерний промінь фокусується на з'єднувальній поверхні матеріалів і забезпечує надвисоку енергію, завдяки якій вона швидко нагріває поверхні матеріалу до станів розплавлення та розтоплення, це призводить до змішування, завдяки якому утворюються стійкі зварні з'єднання.

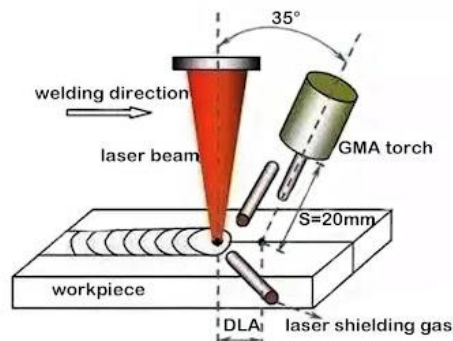


Рисунок 3 Застосування лазерного зварювання

1.4 Лазерна обробка твердих і надтвердих матеріалів

Застосування твердих і надтвердих матеріалів є дуже затребуваним у створенні ріжучих інструментів, бо вони мають специфічні та унікальні механічні зносостійкі властивості. Завдяки створенню різноманітних інструментів з таких матеріалів, корпорації економлять дуже велику кількість фінансів та часу, оскільки вони мають набагато довший термін служби та сильно покращують якість оброблених деталей надаючи їм більшу цінність. Наразі велика частина досліджень фокусується на точній різці, особливих мікроструктурних змінах, модифікації поверхневих властивостей та текстурі ванні матеріалів. Покращення цих поверхневих процесів сприяє кращій продуктивності різання шляхом зменшенню тертя, також знижується знос, зменшуються залишкові напруження та йде покращення відведення стружки та сильне збільшення терміну служби інструменту. Лазерна обробка твердих матеріалів вважається у всьому світі ефективною, новітньою та відтворюваною технологією виробництва, яка придатна для застосування особливо у поверхневій інженерії надтвердих та твердих матеріалів [7,8].

Клас матеріалів, які показниками своєї твердості перевищують 40 ГПа за шкалою твердості започаткованою Віккерсом [9] називають надтвердими матеріалами. Унікальними властивостями даних матеріалів є дуже висока теплопровідність значенням понад $800 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ [10], хімічна стабільність та надвисока зносостійкість. Дякуючи цьому матеріали мають дуже широкий спектр застосування в різноманітних промислових галузях, які будь-яким чином пов'язані з обробкою. Розбираючи детально надтверді матеріали, можна побачити, що алмаз і нітрид бору за своєю природою є найбільш твердими серед усіх зазначених матеріалів, маючи діапазон твердості від 40 до 80 ГПа для полікристалічних алмазів типу РСД, від 59 до 75 ГПа для алмазів, характеристика полікристалічних нітридів бору

кубічного типу (PcBN) варіюється від 28 до 44 ГПа [12]. Якщо говорити про тверді матеріали, то щоб вважатися твердими вони мають мати твердість вище 15 ГПа, наприклад серед них є карбід вольфраму WC, кремнієвий карбід SiC, нітрид титану TiN, та титановий борид TiB₂. Розмір їх зерна та його склад констатує параметри твердості цих матеріалів [7,8].

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

Таблиця 2 Класифікація твердості та надтвердості за шкалою Віккерса [11,12].

Безпосередньо алмаз являє собою алотроп вуглецю, його особливо потужний ковалентний зв'язок та тетраедрична структура відповідають за дуже цінні для промисловості властивості. Щоб виконати умови, при яких стане можливим утворення алмазів температура має перевищувати 1583 К, а тиск бути більшим за 5,2 ГПа [13], саме це є причиною того, що вони мають дуже глибоке самоутворення приблизно на 140 км нижче поверхні Землі її верхній мантії. Саме природні алмази відомі своєю дивовижною та відмінною шорсткістю краю, ідеальною для високоточного різання, а не жаль їх натуральна мікроструктура монокристалів має схильність до демонстрування слабких площин [14]. Їх виникнення спричинені тим, що тетраедричні та кубічні структури містяться середки з більш малою кількістю зв'язків, які дають залежність твердості від напрямку. У PCD якість міцності бере початок від зрощування одних алмазів до інших та гібридизації. Гібридизація sp³ є однією з основних типів демонстрації природного алмазу, при якій з чотирьох орбіталей утворюється форма

тетраедра, де одна орбіталь має тип 's' а три інших орбіталі тип 'p'. На відміну від описаного типу, графітової структури (в тому числі сам графіт) відносяться до гібридизації типу sp^2 , з ключовою відмінністю в тому, що в ньому присутня надслабка зв'язування міжфазного шару. Синтезуючи, дуже важливо точно розуміти ступінь графітизації (у випадку її присутності), бо твердість має залежність від коефіцієнта гібридизації sp^2 та sp^3 . Саме різниця в гібридизації чивідмінності фаз можуть бути результатом відмінних властивостей матерію.

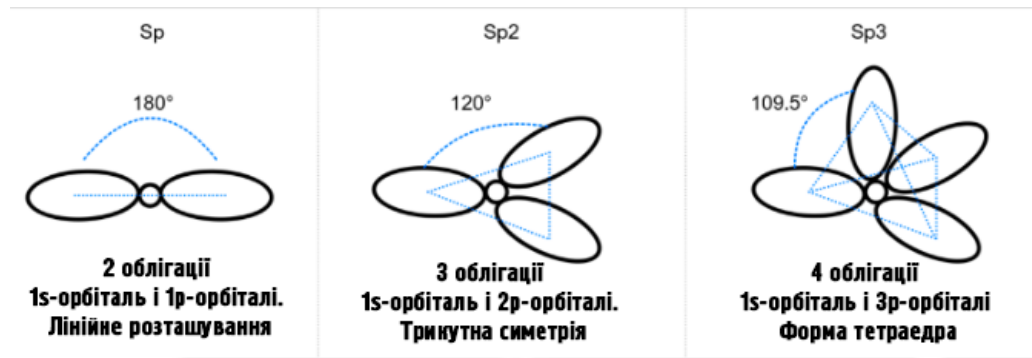


Рисунок 4 Типи гібридизації.

Нітрид бору BN не часто можна побачити у природі, відомо лише про одиноким зареєстрований випадок, коли його знайшли у дуже малих кількостях у тибетських офіолітах, які є породами з високою хромомісткістю [12]. Він є найбільш твердим матеріалом синтетичної будови, що дуже часто застосовують в якості заміника PCD, під час обробки зразків із чорних металів, таких як нікель та інших відповідних сплавів. Аморфний BN має відношення до sp^3 , а в свою чергу гексагональний hBN до sp^2 . Перший по своїй будові має кубічне розташування атомів в моменті спекання в PCD. На малюнку 5а приведена схема PCD, яка порівнюється з PCD. Керамічний композит WC, не існує в природному середовищі, завдяки ковалентному зв'язку він має тверді властивості, також роль відіграє сполучна речовина,

яка докладає властивості міцності, які таким чином компенсують крихкість кераміки. Керамічні та металеві властивості є дуже корисними та надають композиту надміцності та довговічності. У 1950-х роках відбулася найперша поява спечених дисперсних композитів, які мали призначення для вольфраму, вони стали альтернативами для дорогих алмазних штамсів [13], а уже через двадцять років для PCD і PcBN [16]. Проти діяв кліма та загроз з якими мають справу природні матеріали та забезпечення гнучкості властивостей є ключовою задачею композитів. Такі матерії демонструють унікальну зносостійкість, яка має єдиний мінус у більшій сприйнятності до сколів, при використанні меншого відсотка кількості сполучника. Чим більший відсоток, тим краща в'язкість, протеза гальна твердість падає. Полікристалічні структури утворюються з структур які містять кристалічні зерна, з випадковою орієнтацією між собою на зерновій межі. Найбільш слабка взаємодія між ними проходить на границях зерен, з причини нерегулярної довжини зв'язків та плохого координативного зв'язку. Полікристалічна мікроструктура надає можливість протидіяти деформації або пошкодженню від навантажень і прикладених сил.

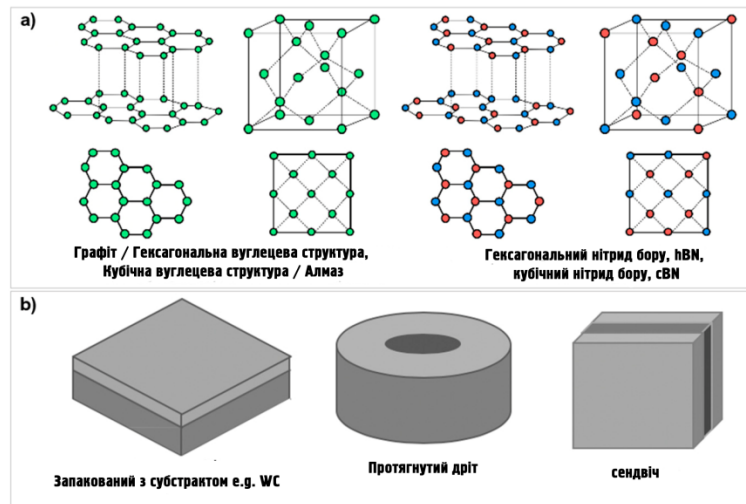


Рисунок 5(а) Схема розташування атомів, (б) можливі формати для полікристалічних матеріалів

1.5 Виготовлення поверхневих текстур

Метод лазерної обробки дозволяє ефективно, дуже швидко та безконтактно обробляти тверді та надтверді матеріалів, які призначені для створення та модифікацій ріжучих інструментів. Цей процес описується як фототермічний, бо під час процесів нагрівання, випаровування і плавлення, які призводять до знищення матеріалу, або у випадку коли стається розрив зв'язку з матеріалом через нестачу часу для проведення процесів в навколишній області дії описує фотохімічний процес. Зазвичай фототеплові перетворення проходять лише в умовах повної термодинамічної рівноваги, при якій за законом Беєра–Ламберта [17], передача теплоти за законами механіки рідини очолюють поведінку розплавленого матеріалу.

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

де $I(z)$ це інтенсивність лазерного променя на певній глибині z , a – коефіцієнт поглинання матеріалу на заготовці, λ – довжина хвилі лазерного променя, k виконує екстинкційний коефіцієнту матеріалу, I_0 показує інтенсивність лазерного променя на поверхні.

Електронна заборонена зона матерії має сильний вплив на поведінку поглинання. Матеріали PCSD і PсBN, які мають ширину забороненої зони більшу за 0 еВ потребують для збудження електронів достатньо потужної енергії із валентних зв'язків [18]. При досягненні цього рівню залишаються електронні дірки, через те що цей процес змушує вивільнитися вільні електрони, які в свою чергу ще й додатково збуджують інші електрони у валентних зв'язках, які зв'язані між собою. Провідність можна викликати при розслабленні електронів, у цьому стані вони вільно проводять енергію до залишок решітки. Матеріали, в яких відсутня заборонена зона мають у своїй структурі вільні електрони (такі як WC), а процес провідності в них розпочинається негайно через що, це потребує

набагато менше енергії для початку вияву провідності.

Імпульсна лазерна абляція є новітнім, але дуже поширеним лазерним методом, який активно застосовується при створенні геометрії поверхні на ряді різноманітних матеріалів, в тому числі твердих та надтвердих композитів [19, 20]. У процесі застосовується імпульсний лазер, який має фіксовану тривалість імпульсу за часом, тобто процес є як фототермічним так і фотохімічним. Лінійність або не лінійність визначається тривалістю імпульсу та флуенсу. Дієвість описаного процесу може мати значне покращення шляхом багатифотонного поглинання, бо в той час, як передана енергія досягне критичної позначки, яка перевищить поріг флуенсу, матеріал зразка аблятує. Під час цього процесу випаровування відбувається витіснення матеріалу для утворення певних поверхневих елементів як викликане процями тиску віддачі та сублимації.

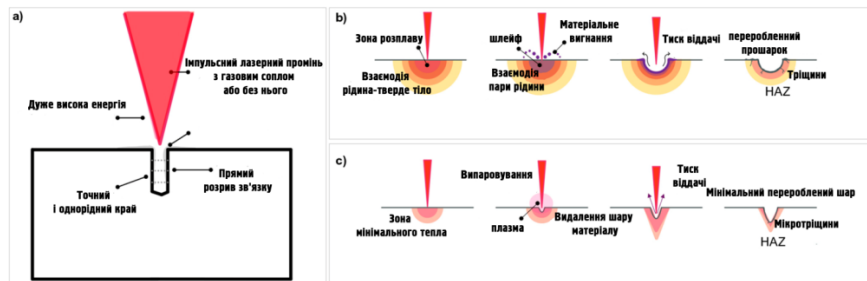


Рисунок б(а) Процес абляції, (б) флуенс \sim поріг абляції матеріалу, (с) флуенс $>$ поріг абляції матеріалу.

1.6 Вплив довжини хвилі та типу лазера на механізм абляції

Процес видалення чи руйнування якоїсь частини з оброблювального об'єкта за допомогою ерозійних процесів, випаровування чи сколювання називають абляцією. До абляційних матеріял можна привести дуже багато різноманітних прикладів, таких як допоміжні матеріали космічних ракет та кораблів, завдяки яким розпочинається їх підйом, а згодом вхід в атмосферу, деякі біологічні тканини які мають широкий спектр застосування, сніг та лід у формах та будові на земній поверхні та їх поширенню поза нею, а також вогнетривкі покриття зі стійкістю до екстремальних температур для пасивного захисту від пожеж. Нижче на рисунку 7 вони показані з довжиною хвилі, яка знаходить матеріальні механізми та розуміє поведінку поглинання. Хвиля довжиною 1064 нм як правило має застосування в абляції твердих і надтвердих матеріалів використовуючи максимальне поглинання, але поглинальна здатність та дієвість оптичного пробою мають кращий результат з більш короткими довжинами хвиль до 532 нм, навіть в таких матеріалах з високою ізоляцією, як PCD і PсBN завдяки багатофотонному поглинанню [22]. Це поглинання дуже легко розганяє рухливість та електронне збудження та має великий плюс в тому, що через це виконується більша швидкість абляції з набагато кращою точністю. Абляція PCD-Co становить 10% і WC-Co рівна 4,6% на двох різних довжинах хвилі розмірами в 532 нм та 1064 нм. Абляційна швидкість була увесь час більшою при різних флюенсах та різних за часом тривалостей імпульсу, коли використовувався 532 нм.

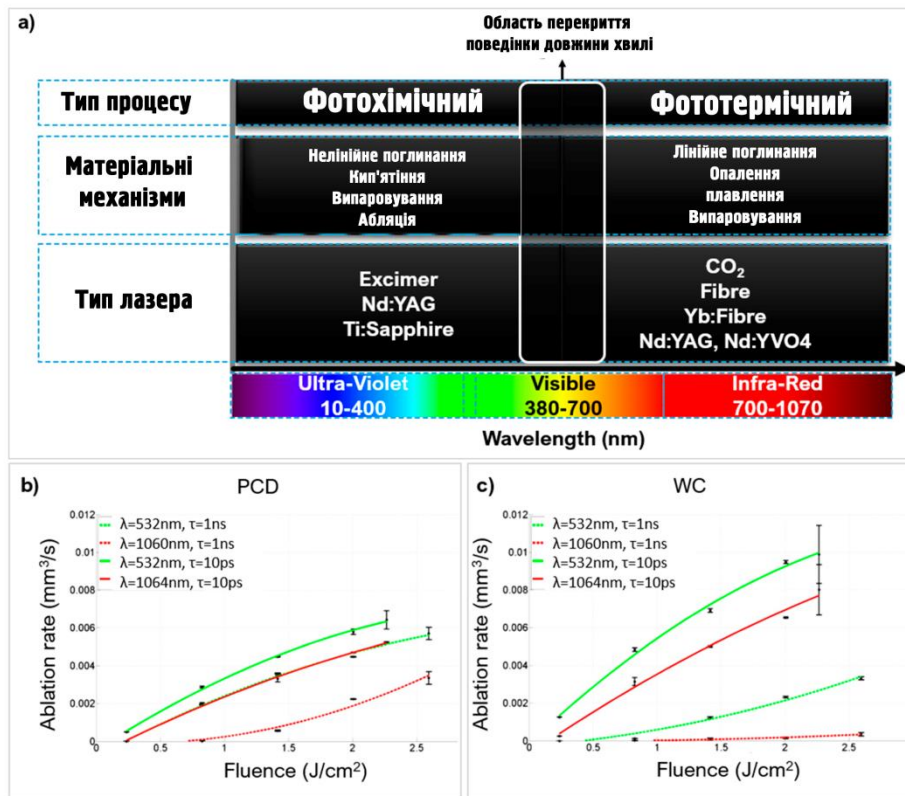


Рисунок 7 (а) Огляд на поведінку матеріалу на різних довжинах хвиль, (б) Швидкість абляції для PCD. (с) Швидкість абляції для WC [21]

Тип (джерело) лазера є середовищем, основною задачею використання якого є дотримання усіх правил для генерації лазерного променя, його вибір є показником енергії фотона пучка. У випадку якщо потрібен фотохімічний механізм, це є особливо важливо, бо енергія фотона повинна бути більшою за енергію зв'язку матерії зразка. На рисунку 10 зображене порівняння звичайних молекулярних зв'язків з енергією фотонів лазерного середовища в твердих і надтвердих матеріалах [23].

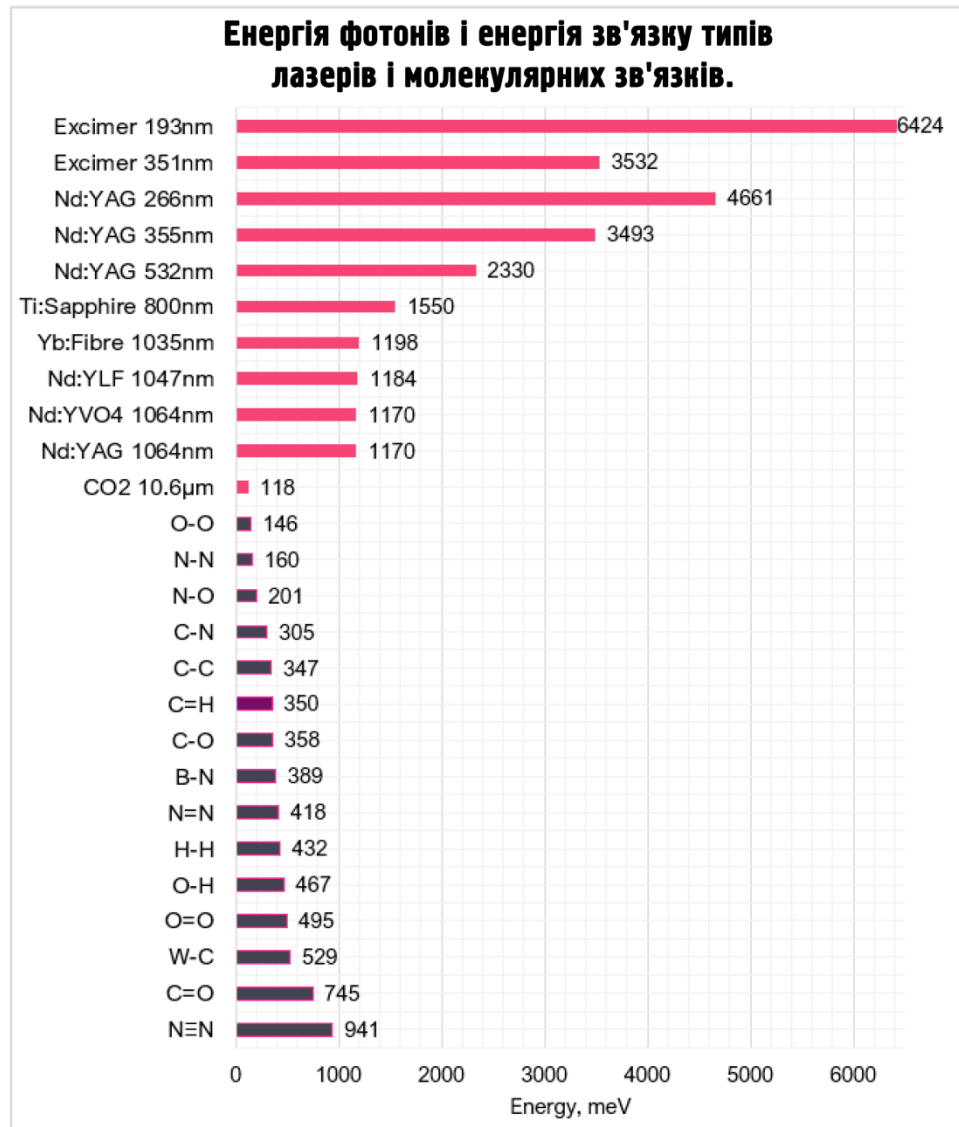


Рисунок 8 Порівняльна діаграма енергії лазерного фотона та значень енергії зв'язку [23].

Nd: YAG, волоконний та ексимерний лазери є найбільш поширеними лазерами у світі для надтвердих та твердих матеріалів, це стосується і багатьох інших лазерних середовищ для твердих і надтвердих матеріалів, наприклад Dumitru та Ti:Sapphire для вузького класу матеріалів WC, TiC і TiN, були продемонстровані при повній абляції матеріалів інструменту різання: WC-Co 10%, TiC, TiN та WC-Co 6%,. Лазери ближнього інфрачервоного типу діапазону легко створюють елементи надмалих розмірів 20 мкм, до них належать неойтербієві Nd лазери [25]. У практичному застосуванні розрізняють

лише три ключові типи лазерів Nd з незначним змінням довжини хвиль від 1064 до 1047 нм: Nd:YAG, перевагою якого є дуже стабільний сигнал заломлення, Nd:YLF та Nd:YVO₄ імпульсування якого проходить з швидкою частотою повторень, що спричиняє до меншого імпульсу та енергії. Багато науковців [24] порівнювали дію різних Nd-лазерів на те, якою буде цілісність поверхні PCD, і прийшли до висновку, що залежність мікроструктурних ушкоджень на пряму залежать від використання кожного Nd-лазера: Nd:YVO₄ спричиняв утворення тріщин на території усієї межі підкладки PCD, а інший лазер Nd:YAG викликав в свою чергу смуги. Перевіривши ці висновки, група інших вчених їх підтвердила [26], та провела ряд своїх досліджень в ході яких виявила, що абсолютна енергія Nd:YAG-лазера є причиною утворення товстого переробленого шару на поверхні матерії, унаслідок надто великого відкладення енергії.

1.7 Вплив тривалості імпульсу на цілісність поверхні

Тривалість часу кожного імпульсу, який пройшов процедуру опромінення змінивши кількість енергії, що він відклав та розподілу на матеріал мішені називається тривалістю імпульсу, він має вплив на реакцію поглинання, так само як і параметр довжини хвилі. Лінійне та нелінійне поглинання працюють навколо наносекундного та фемтосекундного режимів відповідно [27].

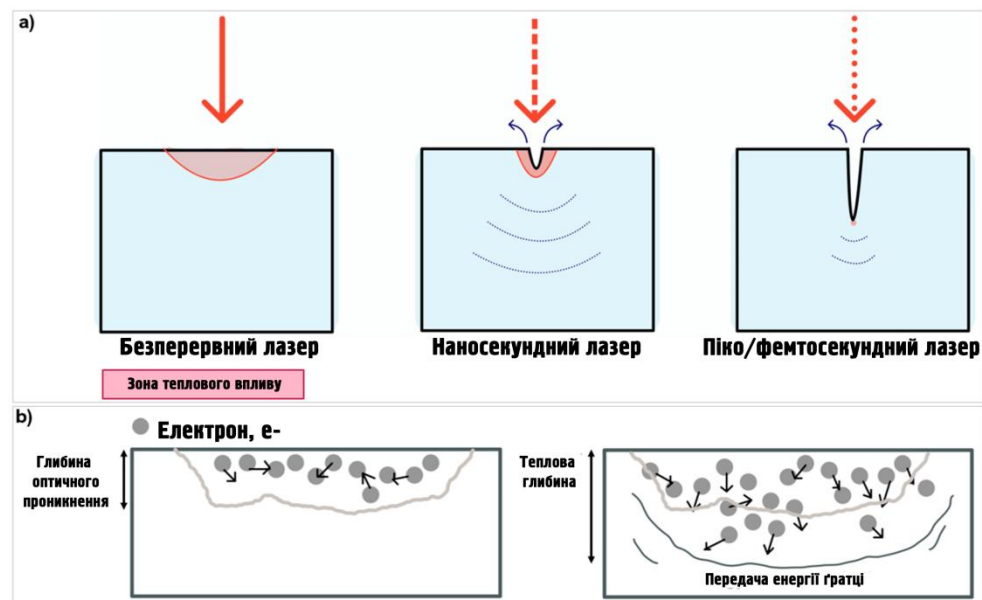


Рисунок 9(а) Схема для порівняння впливу тривалості імпульсу на цільову поверхню, адаптована з [25]. Ударні хвилі показані синіми пунктирними лініями.

Менша тривалість імпульсу показує витіснення матеріалу, (b) Передача енергії електронів на різній глибині

Застосування пікосекундної тривалості імпульсу доводить до зниження товщини ЗТВ на 90%, якщо проводити порівняння з мікросекундним. Цікаво, що пікосекундна область містить ЗТВ, що говорить про те, використання газів, енергія імпульсу та флюенс впливають на розмір ЗТВ [24, 28]. Мала кількість графітизації у мікросекундній області зумовлена тривалим нагріванням лазера, процес проходить через розсієння тепла, і саме це заважає температурі рости в

невеликій ділянці, з метою швидкого фазового переходу від алмазу до графіту. Максимальною межею з максимально значною температурною зміною став діапазон наносекунд, використання більш тривалого по часу імпульса призвело би до негативних наслідків для матеріалу, а саме мова про плавлення та утворення смуг. При використанні часових одиниць виміру за часом менших ніж пікосекунди, сильно знижує ризик деяких термічно індукованих фазових перетворень, проте мала кількість графітизації все ще може бути створена, бо існують області перегрівання.

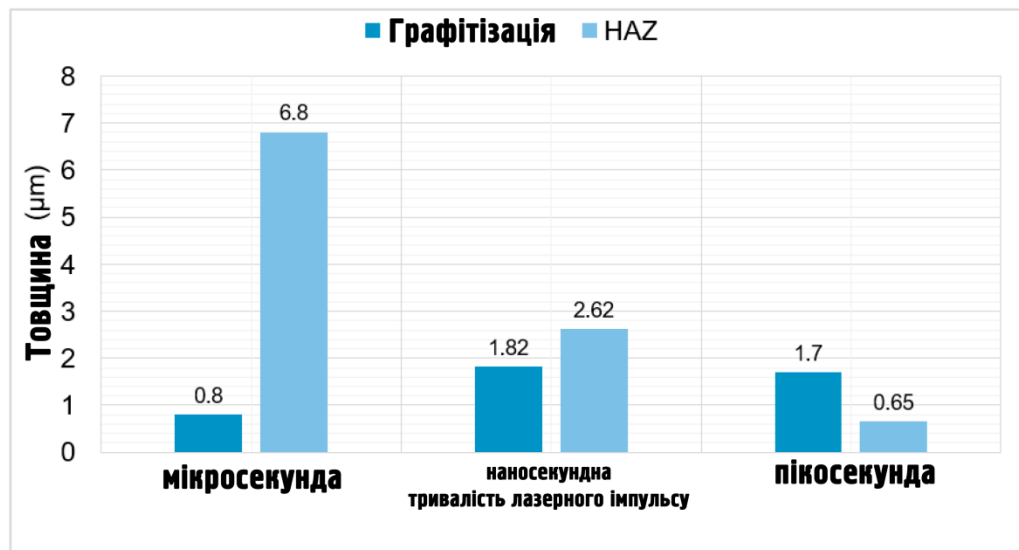


Рисунок 10 Вплив тривалості імпульсу на тепловий перехід при лазерній обробці PCD

Щоб утворити чисті текстури поверхні, треба розігнатися до показників сприятливої швидкості абляції матерію. У надтвердих матеріалах існує флюенс, який максимально наближений до порогового значення і має малу швидкість видалення матеріалу, приблизно від 1 до 30 нм на імпульс [29]. Для знищення матеріалу в основному використовують явище кулонівського вибуху, суть якого полягає в тому, що велика тепла енергія дає змогу іонам у решітці руйнуватися, що призводить до процесу знищення матеріалу. Оброблювальні поверхні дуже часто набагато гладші, але дрібніші, тому лазер має пройти одну

й ту ж саму ділянку декілька разів. Розглядаючи потоки, які сильно перевищують порогове значення, помітили, що вони фактично утворюють фазовий вибух перегріваючи рідину, ця діє дає швидкість відокремлення матеріалу приблизно 100 нм за імпульс. Як результат, більш високий флюенс зробить більш глибокі деталі, не дивлячись на меншу кількість проходів, що є дуже ефективним, але залишиться проблема, що вони часто поєднуються з шорсткістю поверхні більш високого рівня. Нерівномірні специфічні характеристики профілю та його текстури кардинально міняють поведінку, відхиляючись від запланованої продуктивності. Науковці [30] показали, як оптимізована плотність за допомогою волоконного лазера на інструменті PCD призводить до утворення ямок і лінійних канавок. Це дослідження переміряло відстань розфокусування, для зміни плотності. Коли флюенс зменшувався, вдавалося зменшити глибину канавки і видалити набагато менше матеріалу.

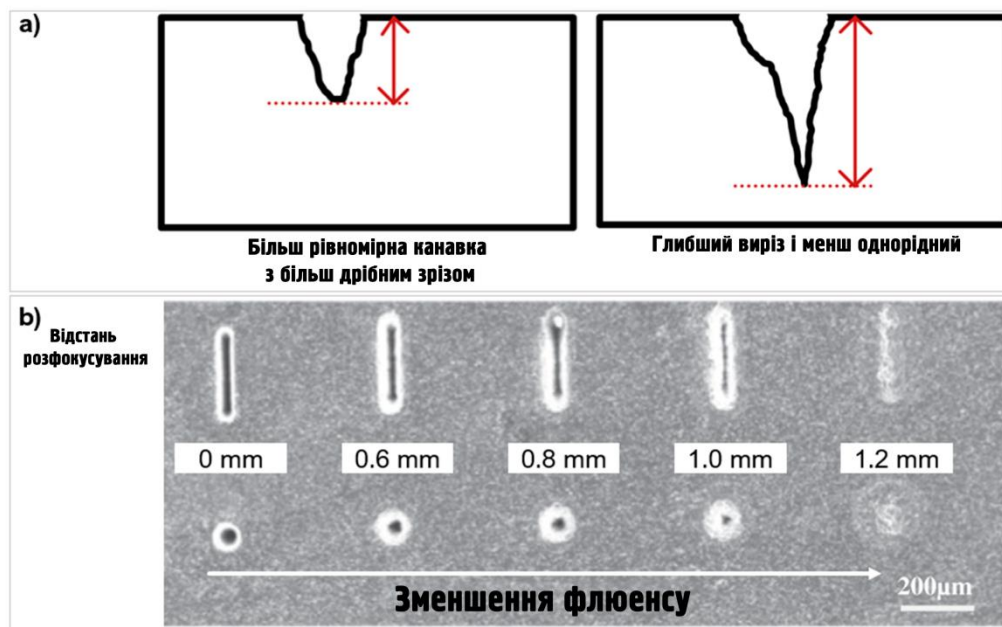


Рисунок 11 (а) Менша плотність потоку порівняно з більшою плотністю, (б) Вплив відстані розфокусування (флюенсу) на PCD на мікротекстуру [92]

За допомогою швидкості сканування, можна зрозуміти за який час деталь піддається дії лазерного променя на певній ділянці. Згідно з характеристиками матеріалу та лазерного променя для забезпечення нормального транспортування енергії, щоб виникало рівне видалення матеріалу з найменшими пошкодженням – його необхідно оптимізувати. В новітніх технологіях обробки матеріалів PCD і PCBN застосовують швидкість подачі з дотриманням діапазону від 2 до 900 мм/с [31 , 32]. Найбільша швидкість змогла проникнути тільки у поверхневому шарі, але транспортувала достатньо енергії, для спричинення розбризкування матеріалу вздовж текстури. Чим менша швидкість глибини канавки, тим краща і чіткіша ставала форма текстури.

РОЗДІЛ 2 ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ ТА ТЕОРЕТИЧНІ МОДЕЛІ

2.1 Теплові ефекти потужного лазерного пучка

Поширення гауссова пучка без урахування теплових ефектів.

Беручи до уваги лазерні пучки з різним профілем інтенсивності, помітили, що пучок з гауссовим профілем має найвищу концентрацію

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

де I_0 відповідає за інтенсивність у центрі гауссового розподілу; а r_0 це радіус розподілу.

Цю закономірність може трактувати квантова механіка, за її принципами найменшу невизначеність має гауссів хвильовий пакет. Якщо не брати до уваги, те що середовище нагрівається шляхом поглинання лазерного випромінювання, тоді під час розповсюдження неперервного лазерного пучка, який має гауссівський профіль інтенсивності, форма розподілу не зміниться, проте його радіус буде становитися більшим, лінійно з відстанню, а осьова інтенсивність навпаки становитися меншою, бо виконується поперечне розподілення енергії пучка і процес поглинання.

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

Теоретична модель

Розглянемо теоретичну модель теплового ефекту. Намічалось, що потужний лазер буде розповсюджуватися вздовжосі z каналу. У параксіальному наближенні хвильове рівняння Максвелла має наступне вираження [33,34]:

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

де E характеризує гонаючу 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, а n_0 – показник заломлення до збурення.

Припустимо E^n є фінальним розв'язком першого рівняння $\text{grad } z = z^n$, тоді розв'язок при $z = z^{n+1}$ буде мати вигляд [33,34]:

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

Дане рівняння демонструє, що поширення на відстань Δz має на увазі поширення в вакуумі поля на певній відстані, а $\Delta z/2$, показує певний приріст фази, який згідно нелінійного середовища видозмінюється з подальшим розповсюдженням результуючого поля завдяки вакууму на певну відстань $\Delta z/2$. Як нам відомо, вихідний сигнал лазера має Гаусів розподіл, для того щоб лазерний промінь працював безперервно. Проводячи лазерний промінь через систему, ми можемо виразити розширювач пучка-коліматор розподілу оптичного поля в площині $z = 0$ таким чином:

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

де P позначає потужність лазера, ω_0 відповідає за радіус перетяжки променя.

Можливо виразити розподіл інтенсивності лазерного променя, який таким шляхом поширюється в газовому середовищі такий спосіб

$$I = |E|^2 \exp(-\alpha_1 z),$$

де α_1 це коефіцієнт поглинання газового середовища.

Розглядаючи гідродинамічне рівняння в особливих ізобарних умовах, які описують зміну густини газу в залежності від часу проблем термічного блокування, є можливість виразити його наступним способом:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + v \cdot \nabla \rho_1 = -\frac{(\gamma - 1)}{c_s^2} (\alpha_1 I + Q_1),$$

де c_s представляє звукову швидкість, γ відповідає коефіцієнту питомої теплоємності, ρ_1 є зміною густини газу, а Q_1 є позначанням тепла, яке одиниці об'єму газу на одиницю часу передало дзеркало.

Зв'язок між густиною газу та флукуаціями показника заломлення може бути представлений цим структурним рівнянням [35]:

$$\frac{n - n_0}{n_0 - 1} = \frac{\rho_1}{\rho_0}$$

де ρ_0 позначає густину газу без збурень.

Якщо поширювати лазер в каналі, то трапиться зміна показника заломлення газу за допомогою пошуку зміни 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 Δz має відносно мале значення, різниця фаз $\Delta \phi_1$, між двома поперечними перерізами можливо виразити так:

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

Після того, як лазер пройде через газове середовище буде виконаний розподіл інтенсивності на поверхні дзеркала, який вважається за I_1 . На рисунку 15 відображено структуру і граничні умови дзеркала. Зауважимо, що воно складається з золотої плівки, монокристалічної кремнієвої підкладки, окрім того на поверхню плівки задіяний вплив газового середовища. Інтерфейс між золотою плівкою і газом позначено за S_1 , а в свою чергу межу розділу між золотою плівкою і кремнієвою підкладкою за S_2 , крім того інші поверхні відмінні від S_2 рахують за адіабатичні. Температура дзеркала змінюється прямо пропорційно з поглинанням частини лазерної енергії. Під час, T_0 є розподілом температурного поля газу біля плівки золота,

T_g відповідає зарозподіл температурного поля плівки золота, а T_s є вираженням температурного поля розподілу кремнієвої підкладки. Як правило, щоб спростити розрахункову модель доводиться нехувати розсіюванням на плівці золота. Золота плівка по своїй природі має надзвичайно сильний коефіцієнт поглинання для того, щоб золота плівка мала можливість утримувати абсолютно всю енергію, яку поглинає дзеркало, а теплообмін проходить між золотою плівкою і газом. Якщо уявити, що плівка золота тонка, в такому випадку температура межі розділу S_2 вважається рівною і буде дорівнювати T_g золотої плівки.

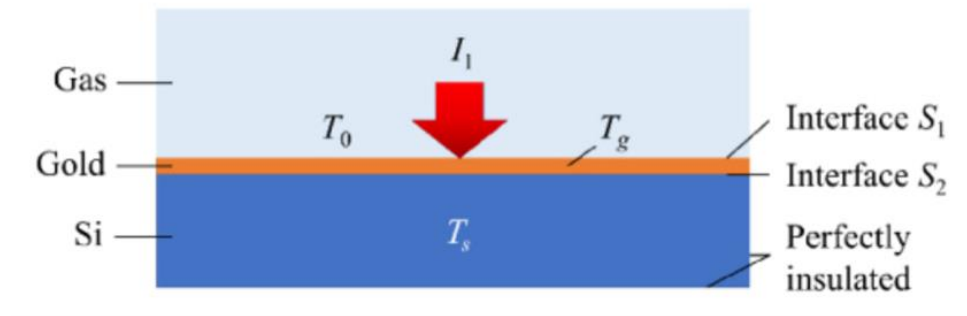


Рисунок 3 Будова і граничні умови дзеркала

Як висновок, енергія, що вибирає золота плівка, призводить до збільшення температури та сильної термічної деформації кремнієвої підкладки за допомогою теплопровідності. Якщо монокристалічна кремнієва підкладка та плівка золота ізотропні, і всі теплофізичні параметри є постійними, в такому разі розподіл температури в кремнієвому субстраті та температурі плівки золота трактується в рівнянні теплопровідності [36]:

$$\nabla \cdot \kappa \nabla T + Q_2 = \rho c_p \frac{dT}{dt}$$

де κ відповідає за безпосередньо процес теплопровідності, c_p є питомою теплоємністю, а Q_2 позначає теплоту,

яке виділяє внутрішнє джерело тепла.

Згідно з рівнянням теплопровідності золоті плівки, вона вбирає у себе частину лазерної енергії, має позначення Q_2 . Інтерфейс S_1 піддається тепловому випромінюванню та конвекції, крім того термічні граничні умови записуються наступним чином:

$$-k \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_1} (t > 0) = h(T - T_0) + \sigma \varepsilon [(T + 273.15)^4 - (T_0 + 273.15)^4]$$

$$Q_2 = \beta I_1 a_2 \exp(-\alpha_2 z)$$

У цьому доволі складному вираженні, h позначає коефіцієнт конвективної теплоїддачі; σ – постійною сталою Стивена-Больцмана і дорівнює $5,67 \times 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; β в свою чергу це коефіцієнт поглинання енергії дзеркала, a_2 визначений, як коефіцієнт поглинання золоті плівки; ε – випромінювальна здатність матеріалу. Шляхом поєднання цих рівнянь можливо отримати для плівки золотарозподіл по температурі T_g . Межа розділу S_2 відповідає температурі на межі кремнієвої підкладки, яку трактують як $T|_{S_2}(t > 0) = T_g$. Важливо що, у рівнянні теплопровідності саме для монокристалічної кремнієвої підкладки температура, яка одночасно є і лазерною енергією, що діє на підкладку, в моменті падає до максимально низьких значень і не відіграє ніякою ролі після того, як лазерний промінь проткне золоту плівку. Незабуваємо, що чим менший коефіцієнт поглинання підкладки, тим більше він буде послабляти поглинання лазерної енергії. Звідси виходить, що $Q_2 = 0$. Дякуючи тонкості золоті плівки, це дає змогу врахувати теплову деформацію дзеркала, рахуючи її за деформаційну підкладку, тобто в той час як температурне поле T проходить нерівномірні зміни, теплова відоміна підкладки монокристалічного кремнію у циліндричних координатах розписується як рівняння термопружності. Ураховуючи усе

вищесказане, для того щоб отримати монокристалічного кремнію субстрат шляхом розподілу температура–поле T нам потрібно використати рівняння:

$$\delta = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}$$

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

де u_r показує компоненти зміщення підкладок в напрямках r , а u_z в свою чергу на напрямках z , μ це коефіцієнт Пуассона, δ відповідає за об'ємну деформацію, α позначається як теплове розширення коефіцієнту. За правилами, кут падіння між лазерним променем і дзеркалом має дорівнює θ .

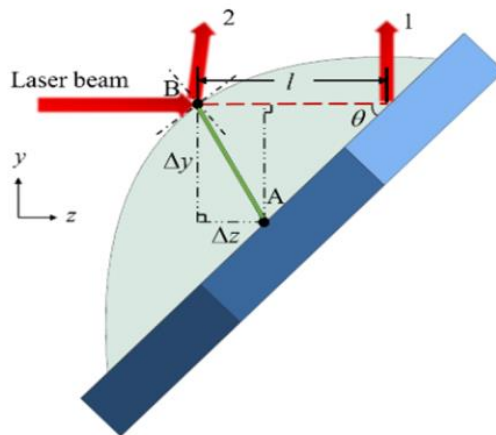


Рисунок 13 Термічна деформація дзеркала

Рисунок 16 відображає теплову видозміну дзеркала в момент часу t . Добре видно, як точка A на своїх координатах піддається деформації і примусово переміщується в положення точки $B(x + \Delta x, y + \Delta y, z + \Delta z)$. Ця деформація є причиною зміни шляху поширення променя з одного оптичного шляху на інший, як результат це призводить до різниці оптичного шляху. Як висновок, різниця фаз $\Delta\phi$ дзеркала при координату $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ треба трактувати таким чином:

$$\Delta\phi_2 = k\left(-\Delta z + \frac{\Delta y}{\tan\theta}\right)$$

2.2 Роль теплової лінзи

Формування певного каналу, який має та радіальний температурний градієнт і підвищену температуру, зумовленою розповсюдженням інтенсивного лазерного променя в середовищі, яке частково вбирає в себе енергію, цей градієнт має безпосередній зв'язок із концентрацією енергії в зоні центрального вісу пучка. Набагато потужніше нагрівання вздовж центральної осі каналу, на відміну від периферійних областей, є причиною сильного зменшення показника заломлення для більшої частини середовищ ($dn/dT < 0$). Проте для деяких особливих матеріалів, по типу кварцового скла, води, кремнія, виконується навпаки зростання осьового показника заломлення ($dn/dT > 0$). У результаті такого процесу утворюється тепла "лінза", яка має різний функціонал у двох різних випадках, диспергує та фокусує його відповідно [37]. На рисунку 14 бачимо залежність від глибини та часу процесів лазерного нагрівання матерію.

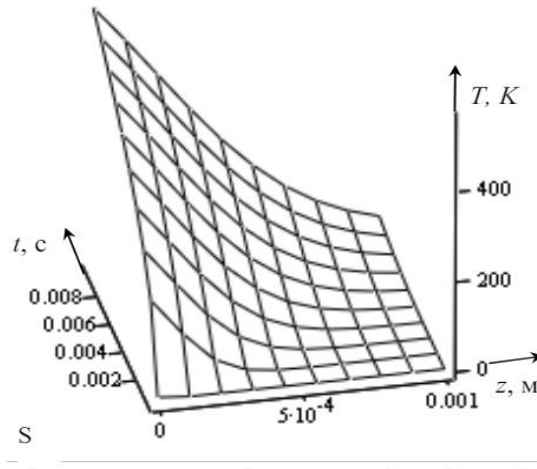


Рисунок 4 Залежність лазерного нагрівання матеріалу від глибини та часу

Щоб знайти значення середньої інтенсивності випромінювання використаємо

$$\text{формулу: } I = \frac{4P}{\pi d_0^2}$$

2.3 Локальне нагрівання сильно поглинального матеріалу лазерним випромінюванням

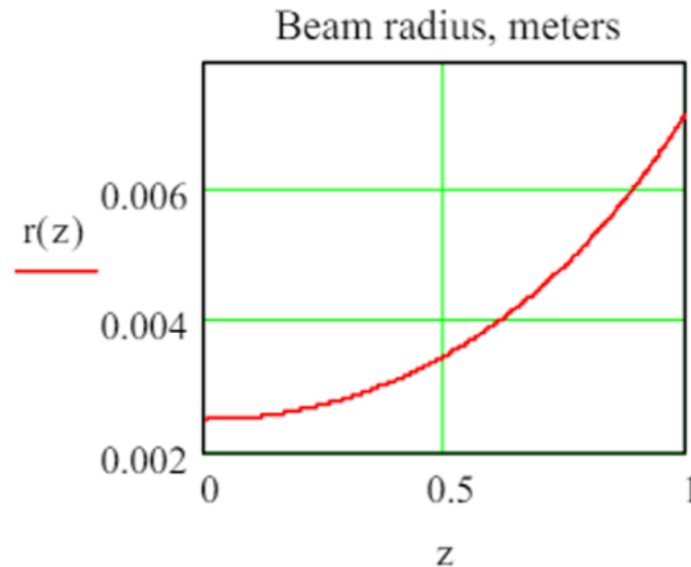


Рисунок 5 Залежність радіуса пучка потужного лазера від шляху в атмосфері

Щоб знайти діаметр фокальної плями треба застосувати рівність між фокусною відстанню лінзи або об'єктива f та певним кутом розбіжності лазерного пучка θ , отримана формула виглядає так:

$$d_f = f\theta$$

У випадку, коли об'єктив, в якому знаходиться чимала кількість лінз, в ньому через частково компенсовані хроматичні та геометричні аберації, саме через це він фокусується на випромінюванні краще ніж звичайна лінза. При падінні паралельного гауссового пучка на об'єктив діаметром d_0 та з довжиною хвилі випромінювання λ , то його можна скласти у деяку фокальну пляму діаметром:

$$d_f = \frac{4\lambda f}{\pi d_0}$$

Щоб прийти до мінімального діаметра лазерної плями об'єкті, усі параметри фокусувальної оптичної системи без виключень, мають бути ретельно підбрані під параметри лазерного резонатора. Щоб описати процес поширення тепла в однорідному матеріалі ізotropними властивостями та незалежною від температури температуропровідності, k_T виражається, як самостійне диференціальне рівняння:

$$\nabla^2 T = \frac{1}{k_T} \frac{\partial T}{\partial t}$$

у якому Лапласіан $\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ займається описом скалярного температурного поля.

За переліком умов нормального падіння лазерного випромінювання на поверхню тіла, вбирання випромінювання з виділенням тепла на дуже тонкий шар матеріалу, товщину якого можна не брати до уваги, бо вона неважлива в порівнянні з показниками розмірів тіла та рівномірної інтенсивності випромінювання на всіх ділянках перерізу лазерного пучка, – вирішенням диференціального рівняння є відношення температури T від певної глибини z та часу t :

$$T(z, t) = \frac{2(1-R)I}{\lambda_T} \sqrt{k_T t} \operatorname{erfc} \left[\frac{z}{2} (k_T t)^{-1/2} \right]$$

де R показує коефіцієнт відбиття матеріалу, I відповідає засередню інтенсивності випромінювання, λ_T трактує теплопровідність; $\operatorname{erfc}(z, t)$ особлива комплементарна функція помилки.

2.4 Оптичні параметри атмосфери

Коефіцієнт екстинкції та показник заломлення повітря, який має пряму залежність від температури та повного атмосферного тиску, включаючи тиск певної водяної пари є двома найважливішими параметрами атмосфери. При

концентрації CO₂ у повітрі майже не перевищується ліміт в 0,03 %, тоді для випромінювання з певної довжини хвилі $\lambda = 633$ нм, показник заломлення повітря шукається за цією формулою:

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

Міліметри ртутного стовпчику виражають обидва тиски у цьому випадку, а температура записана у Цельсіях. Унікальний показник заломлення дуже сухого повітря при такій довжині хвилі буде рівний $n_{\text{air}} = 1,0002765$. Якщо розглядати повітря, як діелектрик, то використане співвідношення Максвелла пов'язує швидкість V у середовищі з діелектричною та магнітною проникністю $\mu : \epsilon = V \sqrt{\epsilon}$ швидкість електромагнітної хвилі у вакуумі. Як не дивно, для основної частини діелектриків $\mu = 1$, саме тому помилково здається, що показник заломлення та діелектрична проникність можна виразити за допомогою співвідношення $n = \sqrt{\epsilon}$, проте ця формула у цьому випадку не має ніякого сенсу, бо вона діє тільки для деяких газів, крім того для довжин хвиль, що розташовані далеко від ліній поглинання газів по типу водню, гелію чи азоту. Дивлячись за областю поглинання, можна побачити дуже сильну дисперсію світла, яка бере початок з резонансного відгуку іонів та електронів речовини на певну електромагнітну хвилю з унікальною частотою ω_0 . Коливання зарядів, які проходять у полі цієї хвилі набувають деяких властивостей гармонічних осциляторів, причому якщо прискорити рух зарядів, це може викликати утворення вторинних електромагнітних хвиль, які своєю колективною дією впливають на явища заломлення та відбиття світла. За допомогою формули Лоренца–Лоренца це можна враховувати у великій кількості випадків:

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

де e позначає заряд електрона, F_{osc} відображає силу осцилятора, яка знаходиться пропорційною ймовірністю деякого переходу атома з енергетичного рівня E_m на інший рівень E_n причому поглинаючи фотон, у випадку, $E_m < E_n$ при випромінюванні фотона, якщо виконується $E_m > E_n$ при коливанні осцилятора електрона, то це маса електрона чи іона в залежності від ситуації, ω являє собою кутову частоту випромінювання, а N_0 є совокупністю концентрації атомів. Особиста частота осцилятора $\omega_0 = \omega_m$, вона має однаковий значення з лінійною поглинання, тому у першому випадку знаходиться в діапазоні видимого та ультрафіолетового випромінювання, а в другому – в діапазоні інфрачервоного випромінювання. Показник поглинання, який позначений величиною k , яку трактують, як поглинання зображено на рисунку 19.

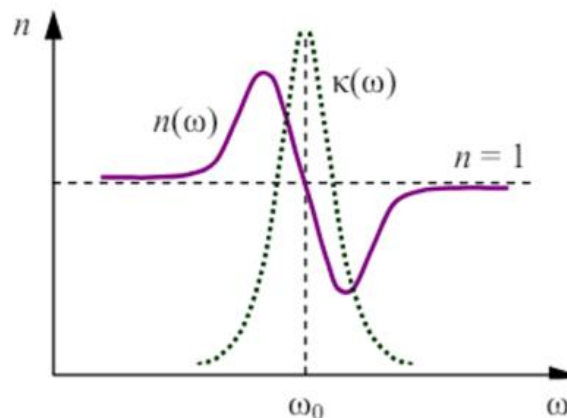


Рисунок 16 Крива дисперсії $n(\omega)$ та крива поглинання $k(\omega)$ світла у речовині

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХНЕВОЇ ОБРОБКИ В COMSOLMULTIPHYSICS

3.1 Огляд програмного забезпечення

COMSOLMultiphysics[38] - це зручне програмне забезпечення, яке дозволяє виконувати чисельне моделювання та симуляції фізичних та хімічних процесів. Завдяки якому інженери та вчені вирішують всеможливі задачі в різноманітних галузях. Користувачі програми мають можливість створювати надскладні моделі, що включають в себе різноманітні фізичні явища, від теплопровідності, до механіки. Завдяки цьому інструменту з'явилася можливість провести моделювання параметрів поверхневої обробки матеріалів.

До найважливіших можливостей COMSOLMultiphysics відносять:

Моделювання мультифізичних явищ: Побудова складних системи, де виконується взаємодія фізичних полів, як електромагнітні поля, теплові потоки, механічні напруження.

Широкий спектр модулів: COMSOLMultiphysics має найширший спектр різноманітних модулів для моделювання різних фізичних явищ, від теплофізики до біохімії.

Гнучкість та налаштовуваність: Завдяки зручному інтерфейсу та мові програмування, COMSOLMultiphysics надає можливість налаштовувати будь-які моделі та вносити власні функції.

Візуалізація та аналіз результатів: Оскільки програмне забезпечення має велику кількість інструментів для аналізу та створення моделей, користувачу легше опрацювати результати досліджених явищ.

Переваги використання COMSOLMultiphysics:

Зменшення часу та витрат на дослідження: Ураховуючи, що COMSOLMultiphysics надає можливість досконально працювати з

складними системами без лабораторних умов, воно дозволяє зберегти дорогоцінний час та кошти.

Підвищення точності та надійності: Завдяки постійним оновленням програмного забезпечення, програма надає доступ до передових чисельних методів, якими можливо поставити будь-який експеримент з високою точністю результатів.

Покращення прийняття рішень: COMSOL Multiphysics допомагає в вирішенні наукових та інженерних питань ґрунтуючись на результатах моделювання.

COMSOL Multiphysics має широкий спектр використання, яскравими прикладами є проектування електронних компонентів, аналіз біохімічних та механічних напружень, симуляція хімічних реакцій тощо.

3.2 Створення програми для симуляції обробки матеріалів

Ключове завдання програми є імітація обробки різних груп матеріалів. За основу обрано дві групи простих речовин, а саме метали та неметали. Групу металів представляє ШХ15-Ш (сталь), яку використовують для виготовлення надтвердих конструкційних деталей з високим ступенем міцності. Виготовляється методом виплавки електродного шарового переплава у кислих маркеновських печах. За неметали взято органічне скло (акрилове), яке має дуже широкий спектр використання. Є синтетичним твердим матеріалом, який виробляють застосовуючи органічні полімери.

Таблиця 3 – Фізичні властивості матеріалів

Властивості	ОРГСКЛО	ШХ15-Ш
Відбивна здатність	0.85	0.8
Щільність	1100 кг/м ³	7800 кг/м ³
Теплоємність	1270 Дж/(кг·К)	460 Дж/(кг·К)
Теплопровідність	0.3 Вт/м·К	40 Вт/м·К

Частина випромінювання відбивається від поверхні матеріалу, а частина нею поглинається під час падіння променя лазерного випромінювання. Оскільки відбивна здатність металів слабшає при зменшенні довжини хвилі, ефективність нагріву в свою чергу збільшується, якщо використовувати лазер з більш малою довжиною хвилі.

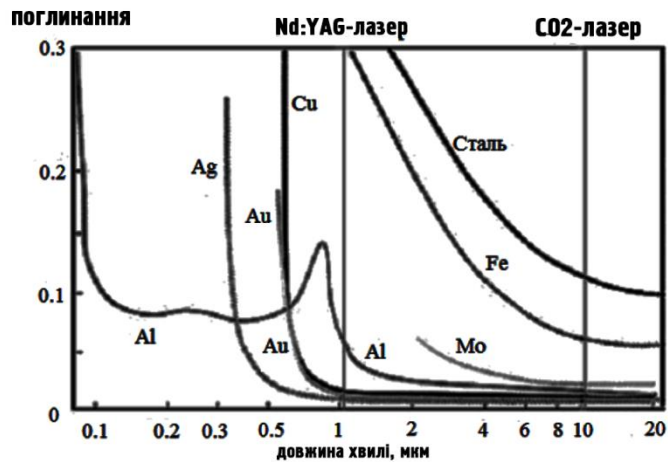


Рисунок 17 – Коефіцієнт поглинання металів

На довжині хвилі 10,6 мкм (саме таку має CO₂-лазер[39]) органічне скло досягає майже нульового коефіцієнта пропускання, завдяки цьому лазерна хвиля може бути змодульована як поверхневе джерело тепла з гаусівським розподілом. Ураховуючи ці фактори для моделювання обробки сталі ШХ15-Ш обрано Nd:YAG-лазер, а для акрилового скла CO₂-лазер. Обидва лазери працюватимуть на середній потужності до 100 Вт.

Таблиця 4 – 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 18 Коефіцієнт пропускання для неметалів

3.3 Моделювання параметрів поверхневої обробки органічного скла

Для розробки моделі використаємо тривимірну модель, оскільки для даної задачі вона підійде краще ніж точкова. Щоб модель сприймала промінь лазера як поверхневий джерело тепла використаємо фізичний модуль, що відповідає за теплопередачу “Heat Transfer”, для відображення передачі тепла у твердо тільних матеріалах задіяний вузол “Heat Transfer in Solids”. Використаємо режим залежності від часу “Time Dependent” (залежність від часу) оскільки рух променя по об’єкту проходить за певний час, також враховуємо геометричні параметри заданого зразка. Програма автоматично змодельює потрібні зображення по завершенню розрахунків для графічного відображення розрахованих даних поверхневого графіку температури (рис.19) та ізотермічного контуру (рис.20).

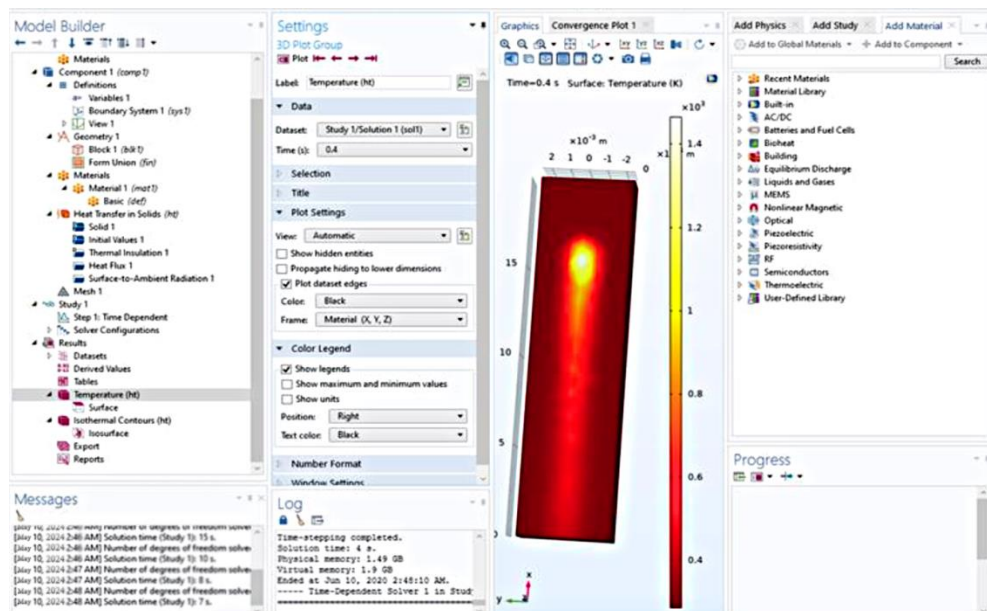


Рисунок 19 Поверхневий графік температури. (момент часу 0,4 с)

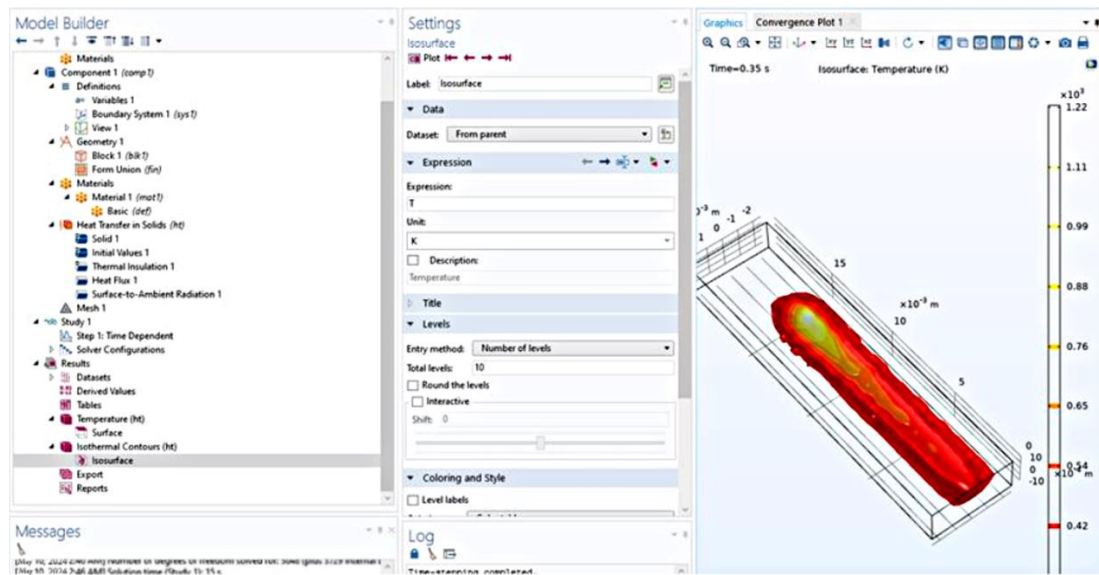


Рисунок 20 Ізотермічний контурний графік температури (момент часу 0,35 с)

На рисунках бачимо зміни температури на поверхні та рух лазерного променя під час всього часу обробки матеріалу, оскільки обидва зображення синхронізовані із часом.

За ізотермічним графіком визначаємо глибину гравіювання матерію. У підрозділі “Definitions” розділу “Component one” додамо зонд для зчитування точних даних значень параметрів. Він автоматично їх зчитає та додасть до таблиці і побудує графіки на основі даних. Вибираємо у підрозділі список зондів “Probes” зонд “Boundary Probe”, який автоматично буде доданий з основною змінною моделі (T). Знімаємо кожну виділену площину крім основної та змінюємо тип зонду на максимум. Він охоплює усю поверхню та шукає середнє значення температури за кожен крок. Для створення таблиць таблиць, у яких зазначена температура та час запускаємо зондування функцією оновлення результатів.

Таблиця 5– 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

З розрахунків видно, що температура більша за температуру абляції органічного скла. Отже, якщо повторити моделювання параметрів в реальних умовах лазер виконає гравіювання скла (рис. 21).



Рисунок 21 Гравіювання оргсклі, виконане за параметрами

3.4 Моделювання параметрів поверхневого зміцнення ШХ15-Ш

При випромінюванні інтенсивним лазерним потоком на обмежену ділянку поверхні матеріалу відбувається поглинання випромінювання в приповерхневих ділянках матерії, внаслідок чого дані ділянки швидко розігріваються до надвисоких температур, цей процес називають лазерним термічним зміцненням. Як тільки припиняється випромінювання, нагріта ділянка внаслідок внутрішньої теплопровідності обсягу матеріалу охолоджується з дуже високою швидкістю. В наслідок процесів охолодження та нагрівання відбуваються фазові перетворення, де у випадку зміцнення, дані процеси будуть класифікувати як зміцнення під час фазових переходах. Отже принцип лазерного зміцнення сталі має призводити до створення мартенситних структур. Температури плавлення сталі варіюється в межах 1300-1500°C, проте за

результатами моделювання процесів лазерного нагрівання, температура на поверхні матеріалу при досліджуванних параметрах всього через 0,1 м становить 1950 °С. Процес загартування з розплавленого стану дає максимальне зміцнення.

При збільшенні тривалості імпульсу показники щільності потужності збільшуються. Обробляючи одиночними імпульсами тривалістю 0,2 мс крім плавлення відбувається «вспінення» металу (рис.22), а мікротріщини утворюються після кристалізації на поверхні при тривалості імпульсів в 0,4 мс. (рис.23). Якщо знизити тривалість імпульсу до 10 мс це призводить до плавлення, яке забезпечує більш високу якість оброблювальної поверхні (рис.24).

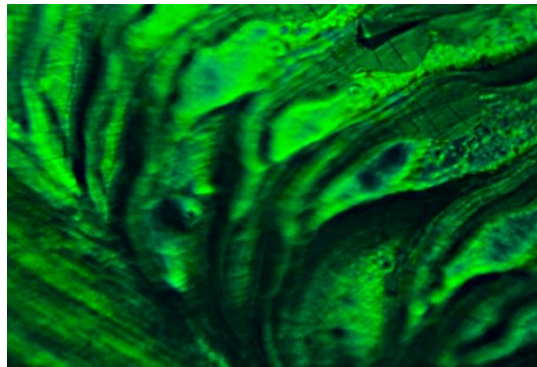


Рисунок 22 ШХ15-Ш (0,2 мс)

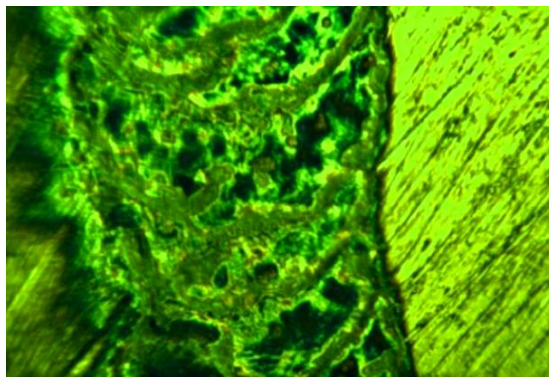


Рисунок 23 ШХ15-Ш (0,4 мс)

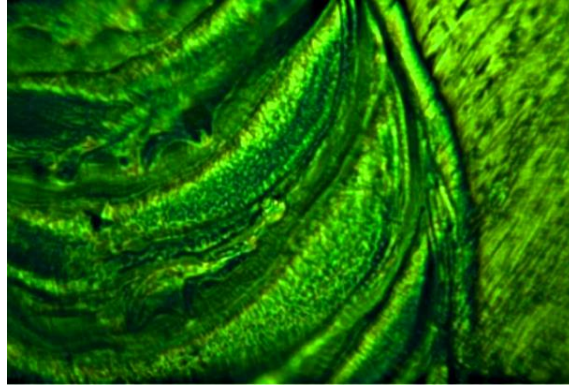


Рисунок 6 ШХ15-Ш (10 мс)

Відношення залежності мікротвердості матеріалу від тривалості прикладеного імпульсу приймає нелінійний характер.

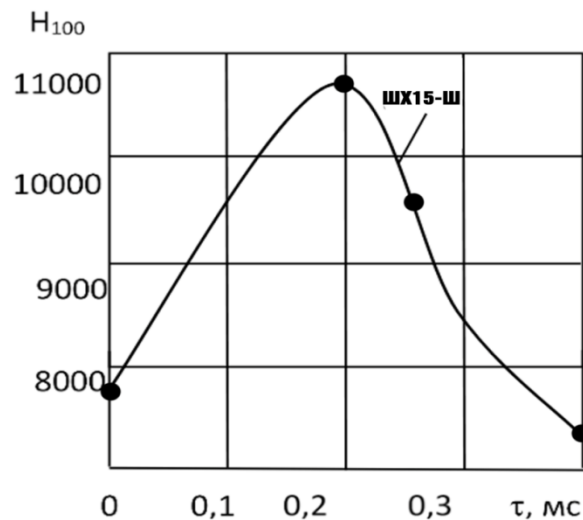


Рисунок 7 Залежність мікротвердості сталі ШХ15 від тривалості

Лазерне зміцнення дає найбільш високі значення мікротвердості в порівнянні з іншими досліджуваними зразками. Максимум мікротвердості досягається під час тривалості імпульсу 0,2 мс. Щоб уникнути розплавлення поверхні при гартуванні матерії треба ретельно підбирати частоту повторення імпульсів зменшуючи їх тривалість. Дана теорія потребує подальшого опрацювання, оскільки за результатами моделювання існує можливість

нагрівання матеріалу нижче температури плавлення, проте вище критичних точок при одночасному поданні серії імпульсів з скороченням їх тривалості у точку.

ВИСНОВКИ

1. У ході виконання кваліфікаційної роботи виконано аналітичний огляд наукових праць по темі лазерної обробки поверхні матеріалів, мікрообробки та поверхневої інженерії для твердих і надтвердих сплавів. Приведені основні вимоги по техніці безпеки при роботі із лазерними джерелами випромінювання.

2. Проаналізовано основні фізичні процеси та їх параметри, що відбуваються при впливі лазерного випромінювання. Розглянуто вплив параметрів лазерного випромінювання на стан матеріалу, що обробляється. Розглянуто моделі теплових ефектів потужного лазерного випромінювання при взаємодії із матеріалами (теплова лінза, деформація дзеркальної золотої плівки на ізоляторі). Проаналізовано вплив газового середовища на розповсюдження лазерного пучка.

3. Проведено симуляцію поверхневої обробки акрилового скла та сталі ШХ15-Ш у залежності від часу експозиції за допомогою програмного симулятора COMSOL Multiphysics. Встановлено, що локальне нагрівання до температури більшої за температуру абляції органічного скла, приводить до ефекту схожому до гравіювання скла. При моделюванні параметрів обробки сталі було визначено, мікротвердість застигнутих розплавів має нелінійну залежність від часу експозиції і впливає на утворення мікрошпарин на їх поверхні. Результати досліджень можуть бути корисними при використанні у лазерних технологіях 3D друку металевих виробів та їх з'єднань у тому числі й біомедичного призначення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Григор'янця А. Г., Шиганов І. Н., Місюров А. І. Технологічні процеси лазерної обробки, 2014.
2. Дудкін В. І., Пахомов Л. Н. Квантова електроніка. Прилади та їх застосування, 2006.
3. Вейко П., Лібенсон М. М., Черв'яков Г. Г., Яковлев С. Б.. Взаємодія лазерного випромінювання з речовиною, 2008.
4. Шевцов, Є. П. Моделювання та оптимізація лазерної обробки поверхні матеріалів. - 2019.
5. Зеленський С. Є., Копишинський О. В. Індуковане лазером теплове випромінювання конденсованих середовищ, 2020.
6. Данилейко О. О., Джемелінський В. В., Шелягін В. Д. Дослідження процесів дугового, лазерного та гібридного зварювання висококоміцних сталей, 2015.
7. Paul, S.; Singh, R.; Yan, W. Lasers Based Manufacturing; Springer: New Delhi, India, 2015.
8. Wu, Z.; Bao, H.; Xing, Y.; Liu, L. Tribological characteristics and advanced processing methods of textured surfaces: A review. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2021.
9. Sumiya, H.; Harano, K. Innovative ultra-hard materials: Binderless nanopolycrystalline diamond and nano-polycrystalline cubic boron nitride. SEI Tech. Rev, 2016.
10. McKie, A.; Winzer, J.; Sigalas, I.; Herrmann, M.; Weiler, L.; Rodel, J.; Can, N. Mechanical properties of cBN-Al composite materials. Ceram. Int, 2011.
11. Denyer, D.; Tranfield, D. Producing a systematic review.pdf. In The SAGE Handbook of Organisational Research Methods; Sage: London, UK, 2009.

12. Novikov, N.V.; Dub, S.N. Hardness and fracture toughness of CVD diamond film. *Diam. Relat. Mater*, 1996.
13. Chang, F.; Gu, D.; Dai, D.; Yuan, P. Selective laser melting of in-situ Al₄SiC₄ + SiC hybrid reinforced Al matrix composites: Influence of starting SiC particle size. *Surf. Coatings Technol*, 2015.
14. Pacella, M.; Butler-Smith, P.W.; Axinte, D.A.; Fay, M.W. The allotropic transformation of polycrystalline cubic boron nitride structures resulting from the thermal effects of pulsed laser ablation. *Diam. Relat. Mater*, 2015.
15. Smith, G.T. *Cutting Tool Technology*; Springer: London, UK, 2008.
16. Chandran, M. Synthesis, characterization, and applications of diamond films. In *Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, 2019.
17. Leitz, K.H.; Redlingshöfer, B.; Reg, Y.; Otto, A.; Schmidt, M. Metal Ablation with Short and Ultrashort Laser Pulses. *Phys. Procedia*, 2011.
18. Robertson, J. Diamond-like amorphous carbon. *Mater. Sci. Eng. R Rep*, 2002.
19. Warhanek, M.G.; Pfaff, J.; Meier, L.; Walter, C.; Wegener, K. Picosecond pulsed laser processing of polycrystalline diamond and cubic boron nitride composite materials. *Laser Based Micro. NanoprocessingX*, 2016.
20. Mishra, S.; Yadava, V. Laser Beam MicroMachining (LBMM)—A review. *Opt. Lasers Eng*, 2015.
21. Eberle, G.; Wegener, K. Ablation Study of WC and PCD Composites Using 10 Picosecond and 1 Nanosecond Pulse Durations at Green and Infrared Wavelengths. *Phys. Procedia*, 2014.
22. Berthe, L.; Fabbro, R.; Peyre, P.; Bartnicki, E. Wavelength dependent of laser shock-wave generation in the water-confinement regime. *J. Appl. Phys*, 1999.
23. Cottrell, T. *The Strengths of Chemical Bonds. Prop. At. Radic. Bond*, 1958.

24. Zhang, G.; Zhang, B.; Deng, Z.; Chen, J. An Experimental Study on Laser Cutting Mechanisms of Polycrystalline Diamond Compacts. CIRP Ann, 2007.
25. Schaeffer, R.D. Fundamentals of Laser Micromachining; Taylor & Francis: Danvers, MA, USA, 2012.
26. Wang, Y.; Molian, P.; Shrotriya, P. Crack separation mechanism in CO₂ laser machining of thick polycrystalline cubic boron nitride tool blanks. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2013.
27. Otake, S.; Ohfuji, H.; Okuchi, T.; Kagi, H.; Sumiya, H.; Irifune, T. Pulsed laser processing of nano-polycrystalline diamond: A comparative study with single crystal diamond. Diam. Relat. Mater. 2009, 18, 877–880. [CrossRef]
28. Zhao, K.; Jia, Z.; Liu, W.; Ma, J.; Wang, L. Material removal with constant depth in CNC laser milling based on adaptive control of laser fluence. Int. J. Adv. Manuf. Technol, 2014.
29. Kodama, S.; Yamaguchi, H.; Shimada, K.; Mizutani, M.; Kuriyagawa, T. Control of short-pulsed laser induced periodic surface structures with machining - picosecond laser nanotexturing with magnetic abrasive finishing, 2019.
30. Su, Y.; Li, L.; He, N.; Zhao, W. Experimental study of fiber laser surface texturing of polycrystalline diamond tools. Int. J. Refract. Met. Hard Mater, 2014.
31. Zhang, X.; Ni, D.; Xiao, B.; Andrä, H.; Gan, W.; Hofmann, M.; Ma, Z. Determination of macroscopic and microscopic residual stresses in friction stir welded metal matrix composites via neutron diffraction. Acta Mater, 2015.
32. Pacella, M.; John, M.G.J.S.; Dolatabadi, N.; Badiiee, A. Microhardness and wear behaviour of polycrystalline diamond after warm laser shock processing with and without coating. Int. J. Refract. Met. Hard Mater, 2019.
33. J. A. Fleck, J. R. Morris, and M. D. Feit, “Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere”, 2016.

34. J. A. Fleck, J. R. Morris, and M. D. Feit, "Time-dependent propagation of high energy laser beams through the atmosphere: II," Appl. Phys, 2017.
35. A. Hussein, L. Hao, C. Yan, et al., "Finite element simulation of the temperature and stress fields in single layers built without-support in selective laser melting," 2013.
36. J. W. Strohbehn, Laser Beam Propagation in the Atmosphere (Springer-Verlag, New York, 2008.
37. Чадюк В. О., Оптоелектроніка: від макро до нано. Генерація оптичного випромінювання (книга друга), 2012.
38. COMSOL Multiphysics Modeling Software.
39. Савченко, О.М. Фізичні процеси при взаємодії лазерного CO₂-випромінювання з матеріалом, 2020.