

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)

МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЛАЗЕРНОГО
ВИПРОМІНЮВАННЯ З МАТЕРІАЛЬНИМИ
СЕРЕДОВИЩАМИ
(тема)

Виконав:
студент 2 курсу, групи ЛОЕТм-20-1
Кіреєв Б. П.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-
вимірювальна техніка
(код і повна назва спеціальності)

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

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

Керівник проф. каф. ФОЕТ Одаренко Є. М.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту

Зав. кафедри _____
(підпис)

Гнатенко О. С.
(прізвище, ініціали)

2021 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 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(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

студентові Кіреєву Богдану Павловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання теплової взаємодії лазерного випромінювання з матеріальними середовищами

затверджена наказом університету від 08 листопада 2021 р. № 1679 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 15 грудня 2021 р.

3. Вихідні дані до роботи довжина хвилі випромінювання – 1 мкм, фізичні параметри матеріалів для симуляції

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі Історія створення лазера. 2 Лазерне різання, зварювання, термообробка. 3 Моделювання лазерного випромінювання в COMSOL. 4 Лазерне джерело нагрівання. 5 Загальна характеристика нагрівання лазерним випромінюванням. 6 Результати чисельних розрахунків

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій
Демонстраційний матеріал – 17 шт.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерну обробку матеріалів	01.09.21–25.09.21	Виконано
2	Дослідження впливу лазерного випромінювання як теплового джерела на матеріал	26.09.21–10.10.21	Виконано
3	Моделювання взаємодії лазерного випромінювання пакетом COMSOL Multiphysics	15.10.21–28.10.21	Виконано
4	Оформлення пояснювальної записки	01.11.21–15.11.21	Виконано
5	Оформлення демонстраційного матеріалу	18.11.21–25.11.21	Виконано
6	Проходження нормоконтролю і отримання рецензії	26.11.21–11.12.21	Виконано
7	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	12.12.21–17.12.21	

Дата видачі завдання 01 вересня 2021 р.

Студент _____
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. каф. ФОЕТ Одаренко Є. М.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 51 с., 17 рис., 10 табл., 1 додаток, 13 джерел.

ВИПРОМІНЮВАННЯ, ЛАЗЕРНЕ НАГРІВАННЯ, COMSOL MULTIPHYSICS, ПЕРЕДАЧА ТЕПЛА У ТВЕРДИХ ТІЛАХ. РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ТЕПЛА У ТВЕРДИХ ТІЛАХ.

Об'єкт дослідження – симуляція взаємодії лазерного випромінювання з різними матеріалами.

Мета роботи – створення програми симуляції лазерного нагрівання матеріалу, а також для вивчення розповсюдження тепла від лазерного джерела в глибині матеріалу.

Метод дослідження – комп'ютерний пакет мультифізичного моделювання COMSOL Multiphysics.

В аналітичному огляді літератури досліджені особливості лазерного нагрівання, досліджено метод скінченних елементів, а також програмний пакет COMSOL, який працює за цим методом.

Експериментально створено програму, що моделює процес взаємодії лазерного променя з матеріалом. Отримано графічне розподілення тепла на поверхні, а також підповерхневе розповсюдження тепла.

ABSTRACT

Explanatory slip of qualification work: 51 p., 17 fig., 10 tables., 1 appendix, 13 sources.

LASER HEATING, CO2 LASER, LASER RADIATION, FINITE ELEMENT METHOD, COMSOL MULTIPHYSICS, HEAT TRANSFER IN SOLID BODIES.

The object of study is the interaction of laser radiation with different materials.

The aim of the work is to create a program to simulate the interaction of a laser with a material, and to study sub-surface propagation of heat from a laser source.

Research methods – computer modeling software COMSOL Multiphysics.

In an analytical review of the literature, the features and nature of the interaction of laser radiation with different materials, finite element method and the COMSOL software package, which works according to this method, were studied.

A program was experimentally created that simulates the process of interaction of a laser beam with a material. A graphical distribution of heat on the surface is obtained, as well as a graph for the heat propagation under the surface of the material.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Лазер. Історія створення. Принцип дії.....	8
1.1 Історія створення лазера.....	8
1.2 Лазерне різання	122
1.3 Лазерне зварювання.....	122
1.4 Термообробка	14
1.5 COMSOL MULTYPHYSICS	155
1.5.1 Моделювання лазерного випромінювання в COMSOL	17
1.5.2 Закон Бугера-Ламберта-Бера	19
1.5.3 Метод огинаючої пучка.....	20
2 Моделювання теплової взаємодії лазерного випромінювання з матеріальними середовищами	22
2.1 Лазерне джерело нагрівання	22
2.2 Рівняння теплопровідності.....	23
2.3 Напівнескінченна металева мішень	24
2.3.1 Плоска тепла хвиля.....	27
2.3.2 Імпульси зростаючої/падаючої інтенсивності	30
2.3.3 Дзвоноподібні імпульси	311
2.4 Загальна характеристика нагрівання лазерним випромінюванням	33
2.4.1 Теплові ефекти в конденсованих середовищах	344
2.5 Результати чисельних розрахунків	36
Висновки	49
Перелік джерел посилання	50
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	52

ВСТУП

Відкриття лазерів спричинило революцію в науці і техніці. За два десятиліття після їх виникнення сформувалися нові фундаментальні і прикладні напрямки фізичної оптики – оптична квантова електроніка і нелінійна оптика. В даний час неможливо уявити ні сучасні фундаментальні дослідження, ні рішення технічних і технологічних завдань без використання лазерів.

Також не малу долю сьогоденного використання лазерів складає промислове використання їх як джерела потужного теплового випромінювання, яке, завдяки дуже малій зоні фокусування, дає можливість використовувати лазер для поверхневої обробки матеріалів, а також різки та зварки.

Лазери – це генератори і підсилювачі когерентного випромінювання в оптичному діапазоні, дія яких заснована на індукованому (викликаному полем світлової хвилі) випромінюванні квантових систем – атомів, іонів, молекул, що знаходяться в станах, суттєво відмінних від термодинамічної рівноваги. Лазери, як і мазери, генератори та підсилювачі НВЧ-діапазону, називають ще квантовими генераторами (підсилювачами), оскільки поведінка беруть участь в їх роботі частинок описується законами квантової механіки [1].

Принциповою відмінністю лазерів від всіх інших джерел світла (теплових, газорозрядних і ін.), що представляють собою по суті справи джерела оптичного шуму, є високий ступінь когерентності лазерного випромінювання. Зі створенням лазерів в оптичному діапазоні з'явилися джерела випромінювання, аналогічні звичним в радіодіапазоні генераторів когерентних сигналів, здатні успішно використовуватися для цілей зв'язку і передачі інформації, а за багатьма своїми властивостями – спрямованості випромінювання, смузї переданих частот, низького рівня шумів, концентрації енергії в часі і т.і. – перевершують класичні пристрої радіодіапазону.[2]

1 ЛАЗЕР. ІСТОРІЯ СТВОРЕННЯ. ПРИНЦИП ДІЇ

1.1 Історія створення лазера

Слово "лазер" складено з початкових літер в англійському словосполученні Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, що в перекладі на українську мову означає: посилення світла за допомогою вимушеного випускання. Отже, в самому терміні лазер відображена так фундаментальна роль процесів вимушеного випускання, яку вони грають в генераторах і підсилювачах когерентного світла. Тому історію створення лазера слід починати з 1917 року, коли Альберт Ейнштейн вперше ввів уявлення про вимушене випускання [3].

Це був перший крок на шляху до лазера. Наступний крок зробив радянський фізик В. А. Фабрикант, який вказав в 1939 р. на можливість використання вимушеного випускання для посилення електромагнітного випромінювання при його проходженні через речовину. Ідея, висловлена В. А. Фабрикант, передбачала використання мікросистем з інверсної заселеністю рівнів. Пізніше, після закінчення Великої Вітчизняної війни В. А. Фабрикант повернувся до цієї ідеї і на основі своїх досліджень подав в 1951 р. заявку на винаходи способу посилення випромінювання за допомогою вимушеного випускання. На цю заявку було видано свідоцтво, в якому під рубрикою "Предмет винаходи" було написано: "Спосіб посилення електромагнітних випромінювань (ультрафіолетового, видимого, інфрачервоного і радіодіапазонів хвиль), що відрізняється тим, що посилене випромінювання пропускають через середу, в якій за допомогою допоміжного випромінювання або іншим шляхом створює надлишковий в порівнянні з рівноважною концентрацію атомів, інших частинок або їх систем на верхніх енергетичних рівнях, відповідних порушеними станами.

Спочатку цей спосіб посилення випромінювання виявився реалізованим в радіодіапазоні, а точніше в діапазоні надвисоких частот. У травні 1952 р. на загальносоюзної конференції по радіоспектроскопії

радянські фізики Н. Г. Басов і А. М. Прохоров зробили доповідь про принципову можливість створення підсилювача випромінювання в НВЧ діапазоні. Вони назвали його "молекулярним генератором". Практично одночасно пропозицію про використання вимушеного випускання для посилення і генерування міліметрових хвиль було висловлено в Колумбійському університеті в США американським фізиком Ч. Таунсом [4].

У 1954 р. молекулярний генератор, названий незабаром Мазер, став реальністю. Він був розроблений і створений незалежно і одночасно в двох точках земної кулі – у Фізичному інституті імені П. М. Лебедева Академії наук СРСР і в Колумбійському Університеті в США.

Згодом від терміна "мазер" і відбувся термін "лазер" в результаті заміни букви "М" (початкова буква слова Microwave – мікрохвильової) буквою "L" (початкова буква слова Light – світло). В основі роботи, як мазера, так і лазера лежить один і той же принцип – принцип, сформульований В. А. Фабрикант. Поява мазера означало, що народився новий напрям в науці і техніці. Спочатку його називали квантовою радіофізикою, а пізніше стали називати квантової електронікою [5].

У 1955 р. Н. Г. Басов і А. М. Прохоров обґрунтували застосування методу оптичного накачування для створення інверсної заселеності рівнів. У 1957 р. Н. Г. Басов висунув ідею використання напівпровідників для створення квантових генераторів; при цьому він запропонував використовувати в якості резонатора спеціально оброблені поверхні самого зразка. У тому ж році В. А. Фабрикант і Ф. А. Бутаєва спостерігали ефект оптичного квантового посилення в дослідах з електричним розрядом в суміші парів ртуті і невеликих кількостях водню і гелію. У 1958 р. А. М. Прохоров і незалежно від нього американський фізик Ч. Таунс теоретично обґрунтували можливість застосування явища вимушеного випускання в оптичному діапазоні; він висунули ідею застосування в оптичному діапазоні не об'ємних, а відкритих резонаторів. Зауважимо, що конструктивно відкритий резонатор відрізняється від об'ємного тим, що

прибрані бічні проводять стінки і лінійні розміри резонатора обрані великими в порівнянні з довжиною хвилі випромінювання [6].

Отже, інтенсивні теоретичні та експериментальні дослідження в СРСР і США впритул підвели вчених в самому кінці 50-х років до створення лазера. Успіх випав на долю американського фізика Т. Меймана. У 1960 р. в двох наукових журналах з'явилося його повідомлення про те, що йому вдалося отримати на рубіні генерацію випромінювання в оптичному діапазоні. Так світ дізнався про народження першого "оптичного мазера" – лазера на рубіні. Перший зразок лазера виглядав досить скромно: маленький рубіновий кубик (1 см×1 см×1 см), дві протилежні грані якого, мали срібне покриття (ці межі грали роль дзеркала резонатора), періодично опромінювалися зеленим світлом від лампи-спалахи високої потужності, яка змією охоплювала рубіновий кубик. Генерується випромінювання у вигляді червоних світлових імпульсів, що випускаються через невеликий отвір в одній з посріблених граней кубика. Схематичне зображення лазера приведено на рис. 1.1.

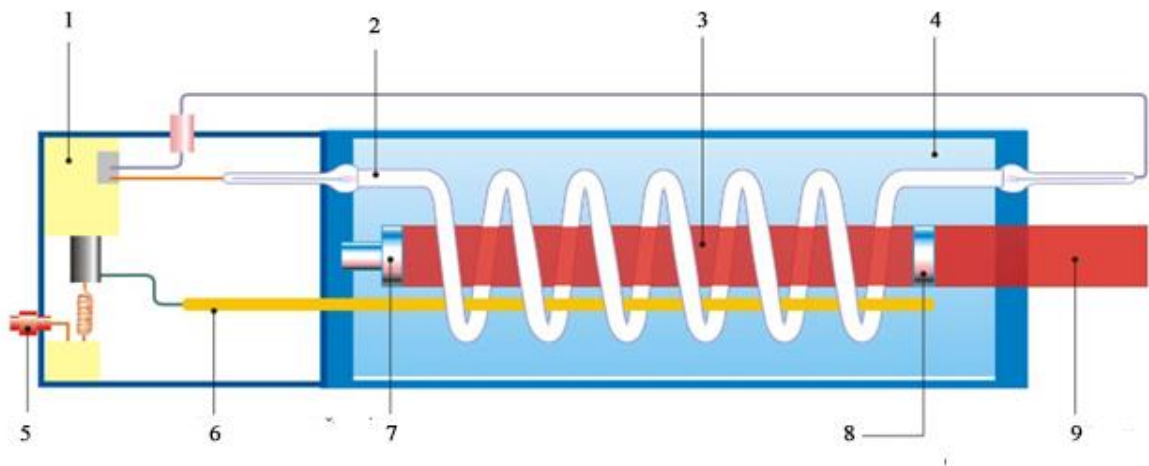


Рисунок 1.1 – Схема твердотілого лазера

Лазер має такі елементи: 1 – джерело живлення, 2 – імпульсна лампа, 3 – рубіновий стрижень, 4 – корпус, 5 – вимикач живлення, 6 – електрод, 7 – непрозоре дзеркало, 8 – напівпрозоре дзеркало, 9 – лазерний промінь.

У тому ж 1960 р. американськими фізиками А. Джаванна, В. Беннет, Е. Ерріоту вдалося отримати генерацію оптичного випромінювання в електричному розряді в суміші гелію і неону. Так народився перший газовий лазер, поява якого було фактично підготовлено експериментальними дослідженнями В. А. Фабриканта і Ф. А. Бутаєва, виконаними в 1957 р. [7].

Починаючи з 1961 р. лазери різних типів (твердотільні і газові) займають міцне місце в оптичних лабораторіях. Освоюються нові активні середовища, розробляється і вдосконалюється технологія виготовлення лазерів. У 1962–1963 рр. в СРСР і США одночасно створюються перші напівпровідникові лазери.

Направимо на поверхню якогось матеріалу, наприклад металу, промінь потужного лазера. Уявімо, що інтенсивність випромінювання поступово зростає (за рахунок збільшення потужності лазера або за рахунок фокусування випромінювання). Коли інтенсивність випромінювання досягне необхідного значення, почнеться плавлення металу. Поблизу поверхні, безпосередньо під світловим плямою, виникає область рідкого (розплавленого) металу. Поверхня, що відділяє цю область від твердого металу (її називають поверхнею розплаву), поступово переміщується в глибину матеріалу в міру поглинання ним світлової енергії. При цьому площа поверхні розплаву збільшується і, отже, теплота починає більш інтенсивно проникати в глибину матеріалу за рахунок теплопровідності. В результаті встановлюється поверхневий розплав. При підвищенні інтенсивності лазерного випромінювання одночасно з плавленням відбуватиметься інтенсивне випаровування (кипіння) матеріалу. Частина речовини перетвориться в пар, внаслідок чого на поверхні металу виникає лунка, починається процес формування отвори [8].

Коли інтенсивність випромінювання досягне максимуму, світло почне сильно іонізувати пари речовини, перетворюючи їх в плазму. Виникнувши, плазма перепинить подальший доступ лазерного випромінювання до поверхні матеріалу – адже світло інтенсивно поглинається плазмою.

1.2 Лазерне різання

Розробка потужних і надійних лазерів на алюміній-ітрієвому гранаті і CO_2 , що працюють в безперервному і імпульсному режимах, дозволила здійснювати технологічну операцію лазерного різання матеріалів, якій притаманні такі особливості: великий діапазон поділюваних матеріалів; можливість отримання вузьких розрізів і безвідходного розділення; мала зона термічного впливу; мінімальне механічний вплив, який чиниться на розділяється матеріал; можливість автоматизації процесу; можливість різання по заданому профілю; поліпшення гігієни виробництва [9].

Воно може бути здійснено або при повному видаленні матеріалу по лінії розрізу, або при частковому видаленні матеріалу, наприклад, при утворенні системи отворів малого діаметра в розрізає пластині по лінії поділу з подальшим розломом (рис. 1.2).

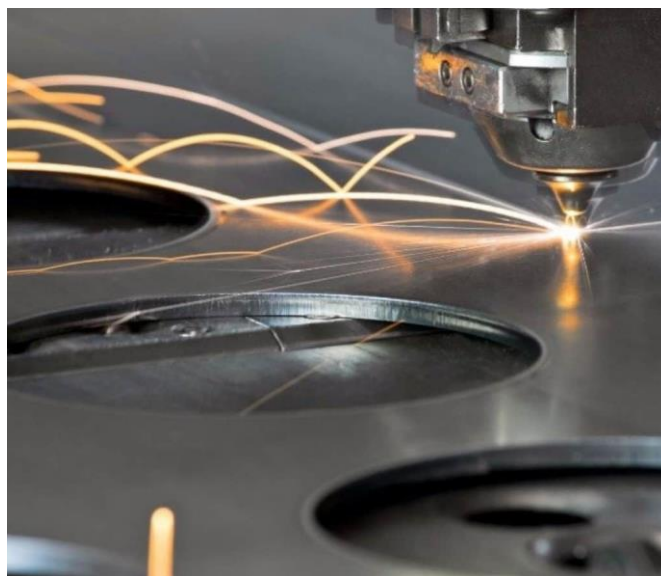


Рисунок 1.2 – Лазерна різка

1.3 Лазерне зварювання

Лазерне зварювання може бути точкового і шовного типу. У більшості випадків застосовують імпульсні лазери, що забезпечують найменшу зону

термічного впливу. За допомогою лазерного зварювання можна отримувати високоякісні з'єднання деталей з корозійностійкої сталі, нікелю, молібдену і ін. Висока потужність лазерного випромінювання дозволяє зварювати матеріали з високою теплопровідністю (мідь, срібло). Для матеріалів, що погано піддаються зварюванню іншими методами (вольфрам з алюмінієм, мідь зі сталлю, берилієва бронза з іншими сплавами), застосовують лазерний метод. Щільність потоку випромінювання на поверхні деталей, що зварюються в залежності від їх матеріалу може бути від 0,1 МВт/см² до 1 МВт/см² [10].

Найбільш ефективно застосовувати лазери для зварювання конструкцій у важкодоступних місцях, при з'єднанні легко деформованих деталей, в умовах інтенсивного тепловідведення (наприклад, для матеріалів з високою теплопровідністю, при низьких температурах і т. д.), а також в тих випадках, коли треба забезпечити мінімальну зону термічного впливу.

При застосуванні лазерного зварювання міцність зварних з'єднань (ширина шва становить кілька міліметрів) досягає рівня міцності зварюваного матеріалу. Здійснюється автоматична лазерна зварювання кузовів автомобілів, зварювання листів титану і алюмінію на суднобудівних верфях, зварювання газопроводів.

Лазерне зварювання успішно конкурує з добре відомими способами зварювання. Воно має низку переваг, які роблять її в багатьох випадках кращою або навіть єдиною можливою. При лазерному зварюванні немає контакту зі зварюваними зразками, а тому немає небезпеки його забруднення будь-якими домішками. На відміну від електронної зварювання, для якої потрібен вакуум, лазерне зварювання проводиться в атмосфері. Лазерне зварювання дозволяє здійснювати швидко і з високою точністю локальне проплавлення в даній точці або уздовж заданої лінії (рис. 1.3). Піддається термічній обробці зона має дуже малі розміри, що важливо, зокрема, в тих випадках, коли зварювання виробляється в безпосередній близькості від чутливих до нагрівання елементів.



Рисунок 1.3 – Лазерне зварювання

1.4 Термообробка

При напрямку лазерного променя на поверхню металу тонкий поверхневий шар швидко нагрівається. У міру переміщення променя на інші ділянки поверхні відбувається швидке охолодження нагрітого ділянки. Так роблять загартування поверхневих шарів, що приводить до істотного підвищення їх міцності. Лазерне гартування дозволяє вибірково збільшувати міцність саме тих ділянок поверхні, саме тих деталей, які в найбільшій мірі піддаються зносу. Так, лазерне загартування застосовують в автомобільній промисловості для зміцнення головок циліндрів двигунів, що направляють клапанів, шестерень, розподільних валів і т. д.

Для підвищення твердості поверхні застосовують також лазерне легування. Легуючі присадки у вигляді порошку попередньо наносять на оброблювану поверхню. При опроміненні лазером поверхні заготовки відбувається плавлення і взаємне перемішування порошку і матеріалу заготовки в межах тонкого поверхневого шару.

Термообробку зазвичай проводять безперервним лазером на CO_2 . (рис 1.4).



Рисунок 1.4 – CO₂ лазер (трубка – резонатор)

Поверхнєве зміцнення металів виробляють ударними хвилями при використанні лазерів, що генерують послідовності імпульсів. У поверхні металу утворюється шар плазми. Плазма поширюється назустріч лазерному променю, в результаті чого народжується ударна хвиля. Оскільки промінь являє собою послідовність імпульсів, виникає послідовність ударних хвиль. Вплив хвиль на металеву деталь надає в даному випадку такий вплив, як під час холодної обробки металу тиском. Лазерна термообробка дозволяє підвищити твердість матеріалу від 20 % до 30 % в порівнянні з традиційними методами зміцнення і в кілька разів зносостійкість [11].

1.5 COMSOL MULTYPHYSICS

COMSOL – це компанія, що активно розвивається і пропонує програмні рішення для моделювання різноманітних фізичних процесів. Продукти компанії дозволяють розробляти та проектувати різні технічні пристрої з високою ефективністю, починаючи від автомобілів та повітряних суден та закінчуючи мобільними телефонами та медичним обладнанням [12].

Флагманським продуктом компанії є COMSOL Multiphysics – потужне рішення для роботи з різними фізичними моделями, що надає повний комплект інструментів для проектування: завдання геометрії об'єкта, що досліджується, додавання додаткових параметрів, обчислення отриманих значень і візуалізування моделі поведінки об'єкта (рис. 1.5). Продукт розширено додатковими модулями з дисциплін: структурна механіка, хімічна промисловість, електромагнітні процеси, мікроелектроніка, геологічні процеси, акустика та багато іншого.

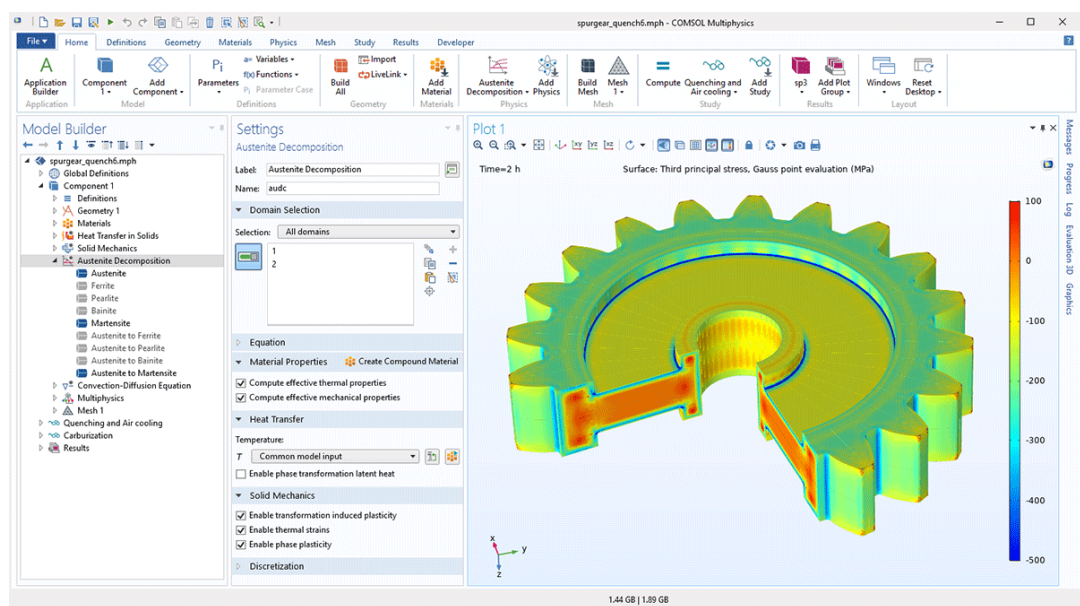


Рисунок 1.5 – Візуалізування фізичних навантажень,
які зазнає шестірня

Пакет дає можливість розв'язати завдання як у математичній постановці як системи рівнянь, і у фізичній, шляхом вибору фізичної моделі (наприклад моделі процесу дифузії). Безумовно в будь-якому випадку вирішуватиметься система рівнянь, і відмінність полягає лише у можливості використовувати фізичні системи одиниць та фізичну термінологію. У так званому фізичному режимі роботи можна використовувати заздалегідь певні рівняння більшості явищ, що мають місце в науці і техніці, таких як перенесення тепла і електрики, теорія пружності, дифузія, поширення хвиль і

потік рідини. Сильною стороною програми є можливість одночасно враховувати різні види фізичних взаємодій.

1.5.1 Моделювання лазерного випромінювання в COMSOL

Незважаючи на те, що існує безліч різних типів джерел лазерного випромінювання, вони всі схожі між собою, якщо розглядати їх з точки зору того, що вони видають на виході. Лазерне випромінювання сконцентровано поблизу однієї довжини хвилі та когерентно. Як правило, вихідне випромінювання сфокусовано також у вузький сколимований пучок. Це сколимоване, когерентне і монохроматичне джерело світла може бути використане як джерело тепла в широкому діапазоні застосувань, включаючи лікування раку, зварювання, відпал, дослідження матеріалів, та обробку напівпровідників.

Коли лазерне випромінювання потрапляє у тверде тіло, частина енергії поглинається, приводячи до локального нагрівання. Рідини та газу також можуть розігріватись лазерами, але нагрівання рідин практично завжди супроводжується сильними конвекційними ефектами.

Тверді тіла можуть бути частково або повністю непрозорі для випромінювання на довжині хвилі лазера. Залежно від рівня прозорості, потрібні різні підходи для моделювання лазерного джерела тепла. Крім того, необхідно пам'ятати, що всі масштаби повинні порівнюватися з довжиною хвилі випромінювання. Різні підходи потрібні для опису сфокусованого випромінювання та щодо широкого пучка. Якщо в матеріалі, що взаємодіє з пучком, що падає, є геометричні особливості порівняні з довжиною хвилі, необхідно додатково розглянути, як саме пучок буде взаємодіяти з цими дрібними структурами.

Перш ніж розпочати моделювання будь-яких взаємодій лазерного випромінювання з речовиною, спочатку потрібно визначити оптичні властивості матеріалу, як на довжині лазерної сили, так і в інфрачервоному

діапазоні. Також потрібно знати як відносні розміри об'єктів, що піддаються нагріванню, так і довжину хвилі лазера та параметри пучка. Ця інформація необхідна для вибору відповідного підходу для моделювання.

Розглянемо спочатку поверхневі джерела тепла. У разі непрозорих на лазерній довжині хвилі матеріалів або близьких до цього можна розглядати лазерне випромінювання як поверхневе джерело тепла. Найбільш просто це зробити за допомогою функції Deposited Beam Power (потужність пучка, що виділяється), яка є доступною в модулі Теплопередача (Heat Transfer Module) пакету COMSOL. Крім цього, також можна задати поверхневе джерело тепла вручну використовуючи тільки ядро пакету COMSOL Multiphysics.

Поверхневе джерело тепла передбачає, що енергія пучка поглинається в шарі знехтувано малої товщини в порівнянні з розмірами об'єкта, що нагрівається. Крок розбиття кінцево-елементної сітки повинен бути достатнім лише для того, щоб врахувати зміни температурного поля та розміри лазерної плями. Саме лазерне випромінювання не моделюється явно, і передбачається, що відбита від матеріалу частина лазерного випромінювання не повертається назад (рис. 1.6).

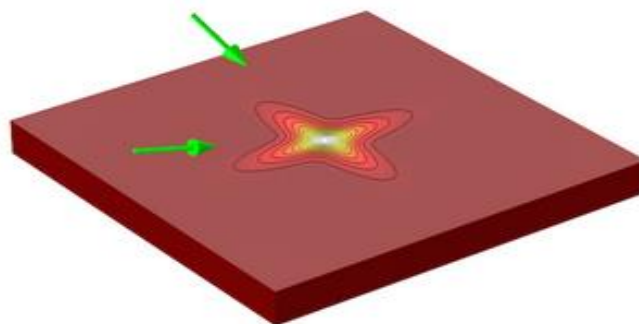


Рисунок 1.6 – Результат формування поверхневого джерела тепла у пакеті COMSOL

При використанні поверхневого джерела тепла необхідно вручну задати коефіцієнт поглинання матеріалу на лазерній довжині хвилі і відповідним чином відмасштабувати потужність пучка, що виділяється.

Якщо виникає необхідність моделювання об'ємних джерел тепла, необхідно використовувати інші підходи. У разі частково прозорих матеріалів, основна частина енергії лазерного випромінювання буде виділятися всередині області, а не на поверхні, і будь-який підхід повинен бути відповідним чином прив'язаний до відносних геометричних розмірів об'єктів і довжини хвилі.

1.5.2 Закон Бугера-Ламберта-Бера

Якщо розмір об'єктів, що нагріваються, і лазерної плями набагато більше довжини хвилі випромінювання, тоді для моделювання поглинання випромінювання в матеріалі підходить закон Бугера-Ламберта-Бера [посилання]. Цей підхід передбачає, що пучок лазерного випромінювання є повністю паралельним та односпрямованим.

При використанні закону Бугера-Ламберта-Бера коефіцієнт поглинання матеріалу та коефіцієнт відбиття від поверхні мають бути відомі. Обидва ці коефіцієнти можуть бути функціями температури. Тому при побудові моделі необхідне відповідне налаштування параметрів. На рис. 1.7 наведено результати моделювання нагріву зразка лазерним випромінюванням за допомогою підходу на основі закону Бугера-Ламберта-Бера.

Такий підхід використовується у разі, коли відома інтенсивність падаючого лазерного випромінювання та відсутні відображення світла всередині матеріалу та від меж об'єкта [11].

1.5.3 Метод огинаючої пучка

Якщо область, що нагрівається велика, але лазерний пучок різко фокусується всередині неї, ні геометрична оптика, ні підхід на основі закону Бугера-Ламберта-Бера не можуть акуратно розрахувати поля і енергетичні втрати поблизу фокусу. Ці методи не вирішують безпосередньо рівняння Максвелла, а трактують світло як сукупність променів. Метод огинаючої пучка, що є в модулі хвильової оптики, є найбільш відповідним вибором у цьому випадку.

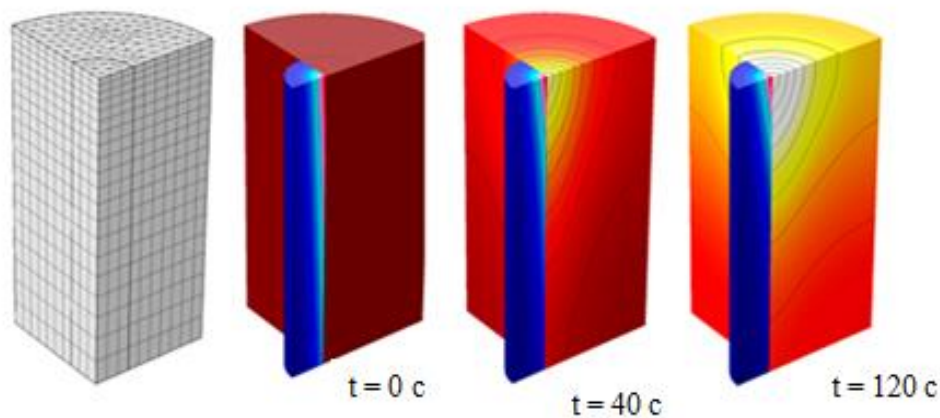


Рисунок 1.7 – Результати моделювання у COMSOL з використанням закону Бугера-Ламберта-Бера

Метод огинаючої пучка вирішує систему рівнянь Максвелла для випадку, коли амплітуда хвильового пакета є функцією координат, що повільно змінюється. Підхід працює, якщо приблизно відомо значення хвильового вектора в середовищі, що моделюється, і наближений напрямок поширення випромінювання. Цей випадок відповідає моделюванню сфокусованого лазерного випромінювання, а також хвилеводних структур, таких як модулятор Маха-Цендера або кільцевий резонатор. Оскільки

напрямок пучка відомий, сітка кінцевих елементів може бути досить грубою в напрямку поширення, зменшуючи тим самим обчислювальні витрати [13].

Метод огинаючої пучка може бути поєднаний з інтерфейсом Heat Transfer in Solids (теплопередачі у твердих тілах) за допомогою мультифізичного з'єднання Electromagnetic Heat Source (електромагнітне джерело тепла). Це з'єднання встановлюється автоматично при додаванні інтерфейсу Laser Heating (лазерне нагрівання) у меню Add Physics (додати фізику).

2 МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ВЗАЄМОДІЇ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З МАТЕРІАЛЬНИМИ СЕРЕДОВИЩАМИ

2.1 Лазерне джерело нагрівання

Хоча розподіл енергії в поперечному перерізі лазерного променя може відрізнятися від випадку до випадку, на практиці зазвичай припускають, що можна безпечно припустити наступні наближення.

По-перше, прийнято вважати, що розподіл енергії є рівномірним у межах кругової плями радіуса R_s :

$$I(r) = \begin{cases} I_0 & \text{для } r \leq R_s \\ 0 & \text{для } r > R_s \end{cases} \quad (2.1)$$

Цей вираз дає гарне наближення для багатомодового лазерного випромінювання. На другому місці йде розподіл Гауса. Типові профілі розподілу інтенсивності та потоку електромагнітної потужності, в даному випадку відповідні одномодовому лазерному випромінюванню, представлені на рис. 2.1. Для опису Гаусових функцій розподілу інтенсивності $I(r)$ або густини енергії $E_s(r)$ зазвичай використовуються дві форми, що відрізняються значенням радіуса просторового розподілу. Наприклад, можна скористатися таким виразом:

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2 / (R_s^e)^2), \quad (2.2)$$

де характерний розмір світлової плями $R_s = R_s^e$ визначається радіусом, при якому інтенсивність в e разів нижча, ніж на осі променя.

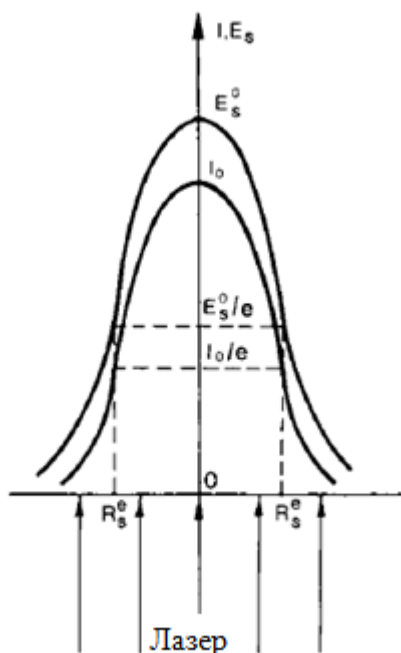


Рисунок 2.1 – Гаусовий розподіл інтенсивності лазерного пучка

В іншому випадку можна використовувати такий вираз:

$$I(r) = I_0 \exp(-r^2 / (R_s^e)), \quad (2.3)$$

де при радіусі $R_s = R_s^e$ інтенсивність у e^2 рази нижча, ніж на осі променя.

Порівнюючи рівняння (2.2) і (2.3), можна зробити висновок про співвідношення $R_s^{e^2} = \sqrt{2}R_s^e$.

2.2 Рівняння теплопровідності

Припустимо, що зразок матеріалу є однорідним і ізотропним. Розглянемо вплив поверхні лише через зміни поглинаючої здатності. Об'ємні дефекти та домішки слід ігнорувати. Тоді у випадку напівнескінченного зразка – найбільш загального випадку, з якого виводяться різні варіанти форми зразка шляхом накладення відповідних обмежень, теплову дію лазерного випромінювання можна описати в термінах змінної температури

$T(x, y, z, t)$ у будь-якій конкретній точці вибірки та в певні моменти часу. Ця величина відповідає рівнянню теплопровідності:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_T \nabla^2 T + A_v I(x, y, z, t), \quad (2.4)$$

де ρ , c , k_T – щільність, питома теплоємність та теплопровідність металу відповідно, а A_v – частка енергії випромінювання, поглиненої зразком за одиницю часу та одиницю об'єму металу.

Рівняння (2.4) дозволяє оцінити температурне поле не тільки під час лазерного імпульсу, а й після вимкнення лазера, коли $I(x, y, z, t > t_p) = 0$.

Температурна залежність теплофізичних параметрів ρ , c , k_T і оптичного параметра A_v металевого зразка робить рівняння (2.4) нелінійним, тому його аналітичне рішення доступне лише в досить обмеженій кількості випадків. Проте за багатьох обставин, що представляють практичний інтерес, температурною залежністю теплофізичних параметрів можна знехтувати, що дозволяє отримати досить прості аналітичні залежності $T(I)$. При подальшому розгляді припускаємо, поглинальна (емісійна) здатність зразка залишається постійною протягом усього процесу лазерного опромінення, що, звичайно, є набагато більш обмежувальною гіпотезою.

2.3 Напівнескінченна металева мішень

Глибина скін-шару в металі δ , становить від кількох десятків до кількох сотень ангстрем для випромінювання найпотужніших доступних на даний момент лазерних джерел, які генерують у спектральному діапазоні.
 $\lambda \approx 0,2-10,6$ мкм.

Довжина поширення l_{th} теплової хвилі за проміжок часу, що дорівнює тривалості τ_p падаючого лазерного імпульсу, може бути оцінена за допомогою наступного виразу:

$$l_{th} = (k\tau_p)^{1/2}, \quad (2.5)$$

де k – теплопровідність металу. Джерело лазерного нагріву можна розглядати як поверхневе джерело протягом усієї тривалості лазерного імпульсу, коли його товщина δ значно менша за глибину теплової хвилі, тобто $\delta \ll l_{th}$. Припускаючи, наприклад, $l_{th} \leq 10^{-6}$ см, з рівняння (2.5) можна отримати, що ця умова виконується у випадку більшості металів, що характеризуються значеннями теплопровідності $k \sim$ для лазерних імпульсів тривалістю менше наносекунди. З іншого боку, напівнескінченне тверде наближення можна застосовувати, коли товщина металевого зразка, h , і довжина теплової хвилі, також відома як глибина теплової дифузії, пов'язані між собою:

$$l_{th} = (k\tau_p)^{1/2}. \quad (2.6)$$

Зауважимо, що якщо перевірити при кімнатній температурі, $T = T_0$, то умова (2.6) ще більш точно виконується при більших температурах, оскільки теплопровідність металів зазвичай зменшується із підвищенням температури.

Розрахункові значення для l_{th} у випадку кількох металів для різної тривалості лазерного імпульсу наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Глибина термальної дифузії металів

Метал	l_{th} (мкм)			
	$\tau_p = 1$ нс	$\tau_p = 100$ нс	$\tau_p = 1$ мкс	$\tau_p = 100$ мкс
Al	0,28	2,84	8,98	89,8
Cr	0,14	1,46	4,62	46,1
Cu	0,30	3,06	9,8	96,8
Au	0,31	3,1	9,8	98,0
Fe	0,15	1,48	4,68	46,8
Pb	0,17	1,37	4,33	43,3
Mo	0,21	2,06	6,51	65,1
Ni	0,12	1,25	3,95	39,5
Pt	0,14	1,42	4,49	44,9
Ag	0,37	3,7	11,7	117
Ta	0,14	1,4	4,43	44,3
Ti	0,09	0,87	2,75	27,5
W	0,23	2,34	7,4	74,0
U	0,10	1,0	3,19	31,9
V	0,09	0,94	2,97	29,7
Zn	0,19	1,88	5,95	59,4
Zr	0,1	0,99	3,13	31,3

Можна помітити, наскільки широкий діапазон розмірів вибірки, для яких можна вважати зразок напівнескінченим. Наприклад, при тривалості $\tau_p = 1$ нс модель напівнескінченного зразка може бути використана для лазерного нагрівання фольги товщиною всього приблизно 1 мкм.

У рамках моделі напівнескінченної вибірки можна виділити два граничні випадки, що визначаються відношенням глибини теплової дифузії l_{th} до радіуса плями опромінення R_s (рис. 2.2).

У випадку, представленому на рис. 2.2, а, коли $R_s \gg l_{th}$ за всю тривалість лазерного імпульсу одновимірна тепла хвиля поширюється в зразок перпендикулярно до поверхні зразка (бічні втрати тепла незначні).

У випадку, представленому на рис. 2.2, б, коли $R_s \ll l_{th}$, лазерне джерело тепла можна прийняти як точкове, а теплове розширення має тривимірний характер.

Ці випадки розглянемо окремо. Вони часто зустрічаються на практиці.

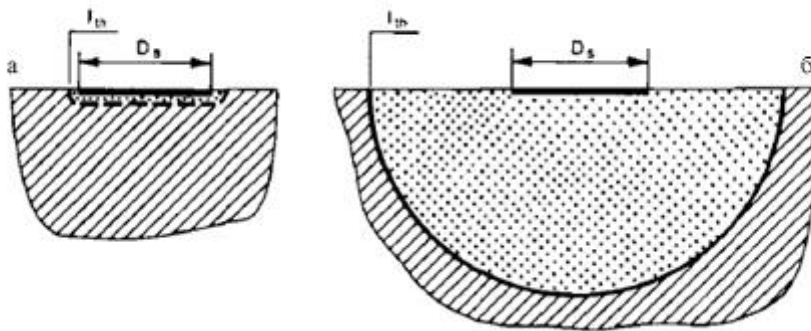


Рисунок 2.2 – Напівнескінченні зразки. Апроксимація плоскої (а) та сферичної (б) теплових хвиль

2.3.1 Плоска тепла хвиля

Якщо падаюче лазерне випромінювання не змінюється з часом, $I(t \leq \tau_p) = I_0$, розподіл температури всередині металу описується в різний момент часу наступним розв'язком рівняння:

$$T(z, t) = (2A_0 / k_T) \sqrt{kt} \operatorname{erfc}[z / 2(kt)^{1/2}]. \quad (2.7)$$

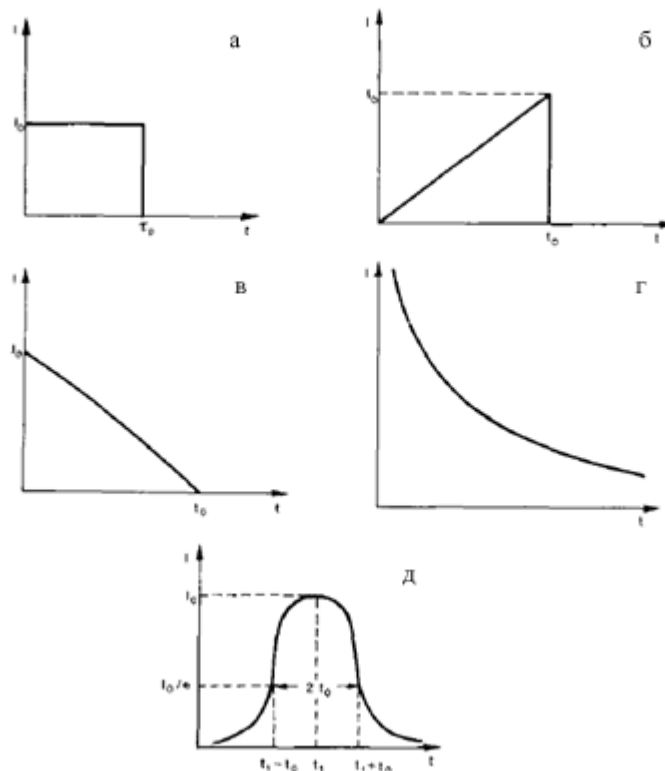
Тут координата z спрямована в зразок, перпендикулярно до поверхні зразка, так що на поверхні ми маємо $z = 0$. Для $z = 0$ рішення (2.7) стає набагато простішим:

$$T(0, t) = (2AI_0 / k_T)(kt / \pi)^{1/2}. \quad (2.8)$$

Слід зауважити, що при дуже великих тривалостях нагрівання ($t \rightarrow \infty$) відповідно до рівняння (2.8) підвищення температури на поверхні, $T \sim \sqrt{t}$, було б необмеженим.

Однак на практиці цього не відбувається через конкуренцію радіаційних втрат із зони опромінення та переходу до тривимірної геометрії. Втрати на випромінювання нижче температури кипіння зазвичай незначні в порівнянні зі звичайними механізмами теплопровідності в металеву масу. Але такі втрати швидко збільшуються з четвертою мірою температури, досягнутої на поверхні. Тому не введені радіаційні втрати в рівняння (2.4).

Далі проаналізуємо вплив форми часу лазерного імпульсу на залежність $T(z, t)$ (рис. 2.3).



- а) прямокутний імпульс; б) збільшення нахилу;
в) зменшення нахилу; г) $I(t) \sim 1/\sqrt{t}$; д) Гаусовий імпульс часу.

Рисунок 2.3 – Еволюція в часі інтенсивності лазерного імпульсу

На рис. 2.3, а була використана прямокутна форма імпульсу випромінювання при висновках розв'язків (2.7) і (2.8) рівняння (2.4). Після припинення лазерного імпульсу при $t = \tau_p$ температура продовжується відповідно до функції

$$T(z, t > \tau_p) = \frac{2AI_0 k^{1/2}}{k_T} \left[\begin{array}{l} t^{1/2} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2(kt)^{1/2}}\right) \\ -(t - \tau_p)^{1/2} \operatorname{ierfc}\left(\frac{z}{2[k(t - \tau_p)]^{1/2}}\right) \end{array} \right]. \quad (2.9)$$

У загальному випадку часова еволюція температури в зразок описується виразом:

$$T(z, t) = \frac{Ak^{1/2}}{k_T \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{I(t - \xi) \exp(-z^2 / 4k\xi)}{\xi^{1/2}} d\xi. \quad (2.10)$$

Відповідно, на поверхні $z = 0$, температура демонструє таку зміну в часі:

$$T(0, t) = \frac{Ak^{1/2}}{k_T \sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{I(t - \xi) \exp(-z^2 / 4k\xi)}{\xi^{1/2}} d\xi. \quad (2.11)$$

Прогрес чисельних методів тепер дає змогу робити висновок про температурне поле всередині металевого зразка практично для будь-якої часової картини інтенсивності падаючого лазерного випромінювання. Що стосується аналітичних рішень, то їх можна отримати лише у окремих випадках.

2.3.2 Імпульси зростаючої/падаючої інтенсивності

Якщо інтенсивність лазерного випромінювання показує лінійне збільшення (індекс +) або зменшення (–) у часі (рис. 2.3 (б, д):

$$I_+(t) = I_0 t / t_0, \quad (2.12)$$

а також

$$I_-(t) = I_0(1 - t / t_0), \quad (2.13)$$

де $0 \leq t \leq t_0$, то з рівняння (2.11) випливає, що

$$T_+(0, t) = (4/3)AI_0 t^{3/2} / [t_0(\pi c p k_T)^{1/2}], \quad (2.14)$$

а також

$$T_+(0, t) = AI_0(t_0(\pi c p k_T)^{1/2}(t/t_0)^{1/2}(2 - 4t/t_0)). \quad (2.15)$$

Цікаво відзначити, що обидва ці імпульси можна апроксимувати прямокутними імпульсами інтенсивності $I(t) \approx I_0$ та тривалості $\tau_p = t_0 / 2$. Кінцева температура, отримана за цих обставин, відповідно до рівняння (2.8):

$$T(0, t_0 / 2) = \sqrt{2}AI_0(t_0(\pi c p k_T)^{1/2}). \quad (2.16)$$

Значення, отримані в співвідношенні (2.16), відрізняються лише на 6 % від кінцевої температури $T_+^{\max} = T_+(t = t_0)$, викликані імпульсом, лінійно зростаючим у часі, розрахованим за співвідношенням (2.14), але вона на 50 % перевищує максимальну температуру T_-^{\max} на поверхні металічних зразків, підданих дії імпульсу лінійно спадної інтенсивності:

$$T_-^{\max} = (2\sqrt{2}/3)AI_0(t_0(\pi c p k_T)^{1/2}). \quad (2.17)$$

В останньому випадку максимальна температура досягається не в кінці імпульсної дії, а при $t = t_0 / 2$.

Узагальнення формули (2.14) описує часову еволюцію температури в металевому зразку під дією лінійно зростаючого лазерного імпульсу:

$$T_+(z, t) = \frac{AI_0 k^{1/2}}{t_0 k_T} (4t)^{3/2} i^3 \operatorname{erfc}[z / 2(kt)^{1/2}], \quad (2.18)$$

де

$$i^n \operatorname{erfc}(y) = \int_y^\infty i^{n-1} \operatorname{erfc}(\xi) d\xi \quad n=1, 2, \dots \quad (2.19)$$

Аналітичний вираз для зміни температури в зразку в часі можна також встановити у випадку, коли інтенсивність падаючого лазерного випромінювання зменшується при будь-якому $t > 0$ пропорційно $\frac{1}{\sqrt{t}}$

(рис. 2.3, г). А саме:

$$T(z, t) = \frac{AI(t)\pi^{1/2}(kt)^{1/2}}{k_T} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{2(kt)^{1/2}}\right). \quad (2.20)$$

2.3.3 Дзвоноподібні імпульси

У багатьох випадках лазерні імпульси мають форму дзвіночка (рис. 2.3, д), яка може бути апроксимована функцією Гаусса:

$$I(t) = I_0 \exp[-(t - t_1)^2 / t_0^2]. \quad (2.21)$$

З виразу (2.11), після відповідної заміни змінних, отримуємо:

$$T_g(0, t) = AI_0 (t_0 / \pi c p k_T)^{1/2} \int_0^{1/t_0} du^{-1/2} \exp[-(u - \frac{t - t_1}{t_0})^2]. \quad (2.22)$$

Деякі значення, отримані шляхом чисельного інтегрування у співвідношенні (2.22), наведено в табл. 2.2. Як видно з цієї таблиці, максимальна температура на поверхні зразка досягається в даному випадку на спадаючій частині лазерного імпульсу, а максимальне значення інтеграла має порядок одиниці. Апроксимація гаусового імпульсу прямокутним імпульсом інтенсивності $I(t) \approx I_0$ та тривалості $\tau_p \approx 1,67t_0$ призводить до такого результату:

$$T^{\max}(0, t = 1.67t_0) = 2,58 AI_0(t_0 / \pi c p k_T)^{1/2}, \quad (2.23)$$

що лише на 20 % вище максимальної температури, досягнутої на поверхні, під дією справжнього гаусового імпульсу:

$$T_s^{\max}(0, t) \approx 2,15 AI_0(t_0 / \pi c p k_T)^{1/2}. \quad (2.24)$$

Таблиця 2.2 Розмірна температура на поверхні металевого зразка в різні моменти часу при дії гаусового імпульсу випромінювання

$(t - t_1) / t_0$	$T_g(0, t) = AI_0(t_0 / \pi c p k_T)^{1/2}$
0	1,82
0,1	1,92
0,2	2,03
0,5	2,14
0,6	2,15
1	1,97

Насамкінець зазначимо, що нагрівання зразка металу під дією типових імпульсів, що випромінюються лазерними джерелами, що складаються з вузького піку з півшириною в кілька сотень наносекунд, за яким слідує хвіст,

який триває кілька мікросекунд, що містить найбільшу частину енергії, детально проаналізована в літературі.

2.4 Загальна характеристика нагрівання лазерним випромінюванням

Вже перші експерименти щодо впливу лазерного випромінювання на матеріали, проведені у 60-х роках минулого століття, показали, що лазерне нагрівання за своєю фізичною сутністю не відрізняється від інших видів нагрівання. Як і при будь-якому іншому нагріванні, однозначною характеристикою теплового дії є температура, а саме нагрівання полягає у збільшенні амплітуди теплових коливань ґрат. Перенесення тепла у твердому тілі здійснюється механізмами теплопровідності, з яких для металів та сильно вироджених напівпровідників основним є електронна теплопровідність, а для неметалів решітка.

Лазерний нагрівання може супроводжуватися зміною оптичних та теплофізичних властивостей матеріалу, його тепловим розширенням, а також фазовими переходами у твердому стані та плавленням. У ряді випадків при нагріванні можуть активуватися дифузійні процеси у твердому тілі та деякі хімічні реакції на його поверхні та в приповерхневих шарах. Отже, нагрівання матеріалів лазерним випромінюванням супроводять звичайні, досить вивчені явища.

У той же час високі швидкості нагрівання та охолодження та великі просторові градієнти температури зумовлюють особливості лазерного нагрівання. Вони можуть призвести і призводять до значних відмінностей у протікання теплових процесів, стимульованих лазерним впливом.

Важливу роль при нагріванні лазерним випромінюванням відіграє зміна оптичних властивостей речовини, тому що від величин поглинальної здатності та коефіцієнта поглинання безпосередньо залежить кількість виділеного тепла та його просторовий розподіл. Утворення зворотних зв'язків

з оптичним параметрам поверхні матеріалу, які змінюються в процесі лазерного впливу, вносить важливі особливості у хід протікають процесів.

Унікальна специфіка лазерного нагрівання проявляється в області коротких і ультракоротких тривалостей лазерних імпульсів і полягає в тому, що необхідно розглядати окремо температури для підсистеми електронів та решітки. Стадія нагрівання матеріалів лазерним випромінюванням є основною при вивченні фізичної сутності технологічних операцій, що проводяться без руйнування матеріалу, наприклад, зварювання, термообробки, дифузії тощо. Для операцій лазерної обробки матеріалів, пов'язаних з руйнуванням та видаленням деякої їх частини, стадія нагрівання є попередньою, але водночас дуже важливою, оскільки її аналіз дозволяє визначити умови початку руйнування.

2.4.1 Теплові ефекти в конденсованих середовищах

Відзначимо основні фізико-хімічні явища, що становлять найбільший практичний інтерес при вирішенні інженерних завдань технології лазерної обробки матеріалів

Плавлення. При опроміненні кристалічного або полікристалічного тіла лазерним випромінюванням достатньої щільності потужності його температура T може зрости до температури плавлення T_m . Температури плавлення різних матеріалів сильно відрізняються приблизно від 500 К для легкоплавких металів (свинець, олово) до 3300 К для тугоплавких (вольфрам, платина). Відповідно змінюється як кількість теплоти, яка необхідно для нагрівання металу від кімнатної температури до температури плавлення, так і прихована теплота фазового переходу тверде тіло розплав. У цьому роль прихованої теплоти плавлення, тобто теплоти, необхідної для руйнування кристалічних ґрат тіла, тим більше, ніж нижче температура плавлення. Якщо продукти лазерного руйнування негайно видаляються з поверхні твердого тіла, наприклад, в результаті обдування струменем повітря, то процес

називається лазерною абляцією. Метою теоретичного аналізу процесу плавлення є визначення товщини розплавленого шару та тривалості плавлення до моменту початку інтенсивного випаровування матеріалу. Знання цих параметрів процесу плавлення дуже важливо, зокрема, при використанні лазерного випромінювання для зварювання.

Випаровування. Рідка фаза, що утворилася при плавленні твердого тіла, може бути нагріта до температури випаровування T_{ev} . Фазовий перехід рідина пара відбувається при підведенні в зону впливу кількості теплоти, що дорівнює або більшої теплоти випаровування L_{ev} . Для низки матеріалів, у яких процес теплового руйнування протікає без утворення рідкої фази, відбувається фазовий перехід тверде тіло пар, що називається сублімацією. Випаровування матеріалів може протікати у вигляді кипіння, для якого характерно виникнення та зростання бульбашок насиченої пари в розплаві поблизу поверхні нагрівання. Випаровування є типовим механізмом лазерної абляції.

При аналізі лазерного випаровування матеріалів дуже важливим є питання про "енергетичної організації" процесу. При малих щільностях потужності поглиненого лазерного випромінювання ($q \leq 10^4$ Вт/см²) руйнування практично всіх металів пов'язано з процесами плавлення та абляції. Частка газової фази в продукти руйнування невелика. Збільшення потужності лазерного випромінювання веде до зростання температури матеріалу ($T \geq T_m$), відповідно зростає і роль випаровування у процесі руйнації. Фізична модель, що описує процес випаровування досить складний. Зокрема, важко визначити частку розсіяного та поглиненого лазерного випромінювання у хмарі пари поблизу поверхні, врахувати вибухові ефекти та взаємодію різних фаз у зоні обробки.

Деякі матеріали (деревина, мінерали) мають інтенсивний лазерний нагрівання веде до випаровування пов'язаної (кристалізаційної) води або інших рідкі компоненти. Подібні легковипарувані продукти створюють

високе тиск у зоні нагріву, що призводить до утворення мікротріщин, викиду частинок матеріалу, розбудові його хімічної структури.

Кристалізація. Теплова дія поглиненого лазерного випромінювання може призводити до зміни структури і, як наслідок, оптичних та електрофізичних властивостей матеріалу у зоні обробки. Характер цих змін залежить від властивостей опромінюваного матеріалу, потужності поглиненого випромінювання, швидкості нагрівання та охолодження. При лазерному впливі кристалізація розплаву може наводити або до утворення матеріалів з іншим типом кристалічних ґрат або до утворення аморфних тіл. При кристалізації відбувається виділення питомої теплоти кристалізації у зоні впливу (при фазовому переході рідина кристалічне тіло вона дорівнює L_m).

2.5 Результати чисельних розрахунків

Створений в пакеті COMSOL проект дозволяє визначати практично весь спектр фізичних характеристик системи, що розглядається. Найбільший практичний інтерес представляють температурні характеристики, які показують динаміку взаємодії лазерного випромінювання з різноманітними матеріалами. Оскільки в моделі розглядається падіння лазерного променя на одну грань зразка у формі прямокутного паралелепіпеда, то основна увага приділяється температурним характеристикам саме цієї поверхні. Крім того, важливим для практики є також просторовий розподіл температури в об'ємі зразка.

В роботі розглядається взаємодія лазерного випромінювання з металічними та діелектричними матеріалами. Ці матеріали характеризуються різними фізичними характеристиками: щільністю, теплопровідністю, емісійною здатністю та іншими. Всі ці характеристики суттєво впливають на температурний режим системи. Особливо слід відзначити емісійну здатність матеріалів, оскільки саме вона характеризує, на скільки ефективно матеріал поглинає теплове випромінювання. Зазвичай цей параметр приймає значення

від 0 до 1, що відповідає ідеально відбивній поверхні та абсолютно чорному тілу. Важливо зазначити, що емісійна здатність залежить від ступеню обробки поверхні зразка матеріалу. Наприклад, зразок з добре відшліфованою поверхнею буде ефективно відбивати випромінювання і, зрозуміло, мати дуже малі значення емісійної здатності (менші за 0,1). Той же самий зразок із шорсткою поверхнею буде поглинати більше випромінювання і характеризуватися більшими значеннями емісійної здатності.

В роботі розглянути два зразки, виготовлені з різних металів (мідь та молібден), та два зразки з діелектричних матеріалів, що широко застосовуються (кремній та кварц). Оскільки не має сенсу шліфувати зразки перед обробкою лазерним випромінюванням, то параметри зразків бралися такими, що відповідають необробленим поверхням. Це збільшує ефективність взаємодії лазерного випромінювання з матеріалами, що обробляються.

Таблиця 2.3 – Фізичні параметри міді як вбудованого в систему матеріалу

Material Contents				
	Property	Variat	Value	Unit
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant pressur	Cp	385[J/(kg*K)]	J/(kg·K)
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	8960[kg/m^3]	kg/m³
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k_iso	400[W/(m*K)]	W/(m·K)
	Relative permeability	mur_is	1	1
	Electrical conductivity	sigma	5.998e7[S/m]	S/m
	Coefficient of thermal expansion	alpha_	17e-6[1/K]	1/K
	Relative permittivity	epsilo	1	1
	Young's modulus	E	110e9[Pa]	Pa
	Poisson's ratio	nu	0.35	1

Розглянемо спочатку зразки, виготовлені з металів. В таблиці 2.3 представлені фізичні параметри для міді, яка є вбудованим матеріалом в пакеті COMSOL.

Найбільш важливими з цих параметрів є теплоємність, щільність та теплопровідність. Цілком природними для металів є велика щільність та значна теплопровідність, що викликає доволі швидке нагрівання цих матеріалів зовнішнім випромінюванням. Електричні параметри міді в рамках розглянутої задачі не є суттєвими, оскільки досліджується тільки тепловий вплив лазерного випромінювання на досліджувані зразки з різних матеріалів. Крім того, модель системи побудована на основі модуля пакету COMSOL, який розраховує потоки тепла в твердих тілах. Отже електромагнітні явища в даному випадку не розглядаються і до уваги береться тільки тепловий вплив електромагнітного випромінювання.

Емісійна здатність міді бралася рівною 0,3 виходячи з даних, опублікованих у відкритих джерелах. В таблиці 2.4 наведені параметри моделі, яка містить всі ключові дані, необхідні для побудови розрахункового проекту. Зокрема це розміри зразка матеріалу, емісійна здатність (emissivity), швидкість руху лазерного променя уздовж зразка та інші.

Таблиця 2.4 – Параметри моделі мідним зразком

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
slab_d	5 [mm]	0.005 m	
slab_h	2 [mm]	0.002 m	
slab_w	20 [mm]	0.02 m	
P	20 [W]	20 W	
speed	2.5 [mm/s]	0.0025 m/s	
spot	0.0005 [m]	5E-4 m	
time	slab_w/speed	8 s	
emmissivit	0.3	0.3	
tp	0.4[s]	0.4 s	
t_crit	1000 [degC]	1273.2 K	

Розрахунковий проект, створений в роботі, дозволяє визначати динаміку зміни температури тієї грані зразка, на яку падає лазерний промінь. Результати цих розрахунків представлені на рис. 2.4, де зображена залежність температури від часу. Слід враховувати, що після включення джерела випромінювання лазерний промінь починає рухатися уздовж зразка з постійною швидкістю такою, що всю довжину зразка він проходить за 8 с. На рисунку видно монотонне зростання температури поверхні, що оброблюється, від кімнатної температури до 370 К. Це досить невелика температура, що пояснюється швидким відводом тепла вглиб зразка завдяки доволі великій теплопровідності міді.

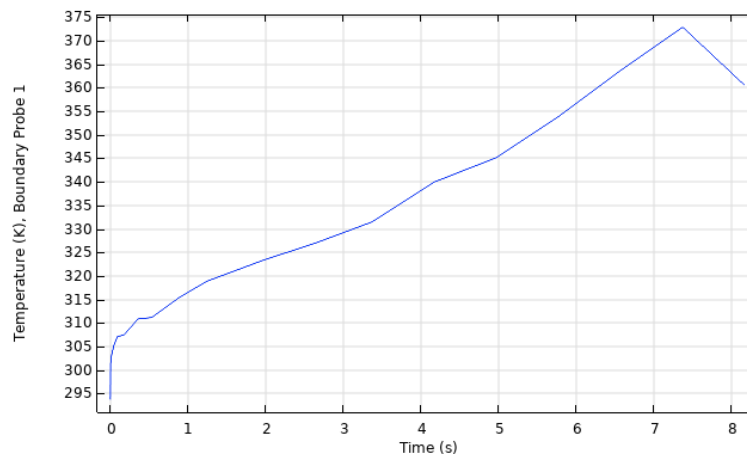


Рисунок 2.4 – Залежність температури верхньої сторони зразка від часу

Щоб візуалізувати процес переносу тепла в об'ємі зразка, був побудований просторовий розподіл температури в перетині цього зразка. Результати цих розрахунків представлені на рис. 2.5. На цьому рисунку видно, що лазерний промінь падає на зразок зверху. Крім того, видно, що завдяки високій теплопровідності розподіл тепла є досить рівномірним. Зокрема, різниця в температурі між максимально нагрітою точкою фокусування лазерного променя та протилежною стороною зразка не

перевищує 10 К. Слід зазначити, що на цей розподіл температури впливає також невелика товщина зразка (2 мм). Зрозуміло, що більш товсті зразки будуть нагріватися повільніше зі збереженням основних фізичних закономірностей теплового впливу лазерного випромінювання на матеріал.

Загалом видно, що фронт теплової хвилі є сферичним, що цілком природно, оскільки зразок матеріалу нагрівається гаусовим лазерним променем із заданим радіусом фокусувальної плями (0,5 мм). Отриманий просторовий розподіл тепла за основними ознаками досить добре співпадає з даними, наведеними в науково-технічній літературі. Це свідчить про те, що побудована в роботі модель достатньо вірогідна і може бути застосована для дослідження фізичних процесів, що відбуваються при нагріванні матеріалів лазерним випромінюванням.

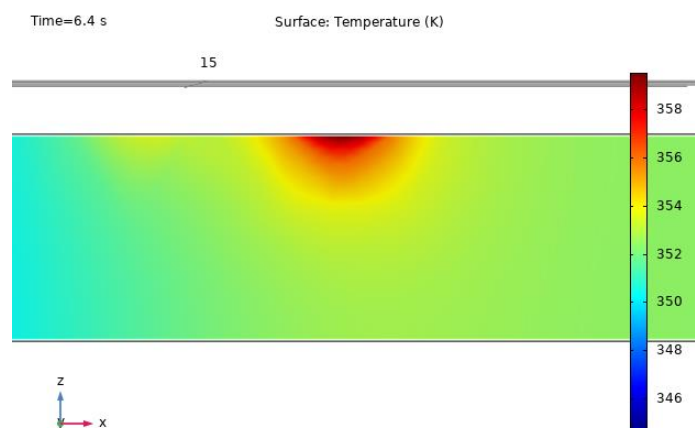


Рисунок 2.5 – Просторовий розподіл температури в об'ємі зразка міді

Розглянемо далі інший метал – молібден. Основні фізичні параметри молібдена наведені в таблиці 2.5.

Порівняння з даними, наведеними в таблиці 2.4 для міді, свідчить про деякі суттєві відмінності цих двох металів стосовно їх теплових властивостей. Зокрема, теплопровідність міді є досить високою, що обумовлює її використання в радіаторах радіоелектронної апаратури.

Таблиця 2.5 – Фізичні параметри молібдену як вбудованого матеріалу

Material Contents			
Property	Variat	Value	Ur
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	10200[kg/m ³]	kg
<input checked="" type="checkbox"/> Heat capacity at constant pressure	Cp	250[J/(kg*K)]	J/
<input checked="" type="checkbox"/> Thermal conductivity	k_iso	138[W/(m*K)]	W
Coefficient of thermal expansion	alpha	4.8e-6[1/K]	1/
Young's modulus	E	3.12e11[Pa]	Pa
Poisson's ratio	nu	0.31	1
Murnaghan third-order elastic modu	l	-3.0e11[Pa]	N
Murnaghan third-order elastic modu	m	-8.5e11[Pa]	N
Murnaghan third-order elastic modu	n	0.1e11[Pa]	N

В той же час теплопровідність молібдену в кілька разів менша, що обумовлює відмінності в теплових характеристиках моделі не зважаючи на те, що емісійна здатність цих двох металів приблизно однакова і дорівнює 0,3 (табл. 2.6).

Таблиця 2.6 – Параметри моделі з молібденовим зразком

Parameters			
Name	Expression	Value	Descriptio
slab_d	5 [mm]	0.005 m	
slab_h	2 [mm]	0.002 m	
slab_w	20 [mm]	0.02 m	
P	20 [W]	20 W	
speed	2.5 [mm/s]	0.0025 m/s	
spot	0.0005 [m]	5E-4 m	
time	slab_w/speed	8 s	
emmisivit	0.3	0.3	
tp	0.4[s]	0.4 s	
t_crit	1000 [degC]	1273.2 K	

Відмінності теплопровідності молібдену від міді призводить до деяких змін в результатах розрахунку. На рис. 2.6 представлена часова залежність температури. Порівняння з результатами розрахунків для міді свідчить про зростання температури верхньої поверхні зразка молібдену. Це очікуваний

результат, оскільки зниження теплопровідності матеріалу призводить до уповільнення відбору тепла від поверхні, яка опромінюється лазером.

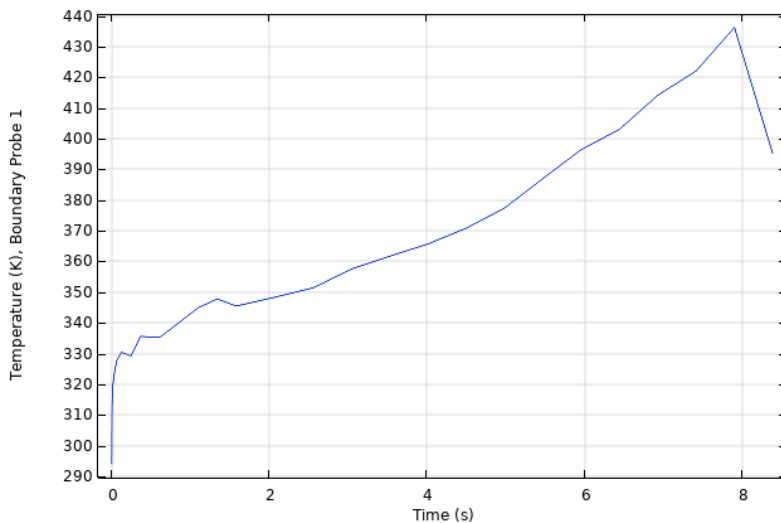


Рисунок 2.6 – Часова залежність температури верхньої поверхні зразка молибдену

На рис. 2.7 представлені результати розрахунку просторового розподілу температури зразка молибдену в поздовжньому перетині (площина xz). В цьому випадку видно, що перепад температур між протилежними поверхнями зразка збільшився у порівнянні із міддю (рис. 2.7). Для молибдену цей перепад складає понад 20 К.

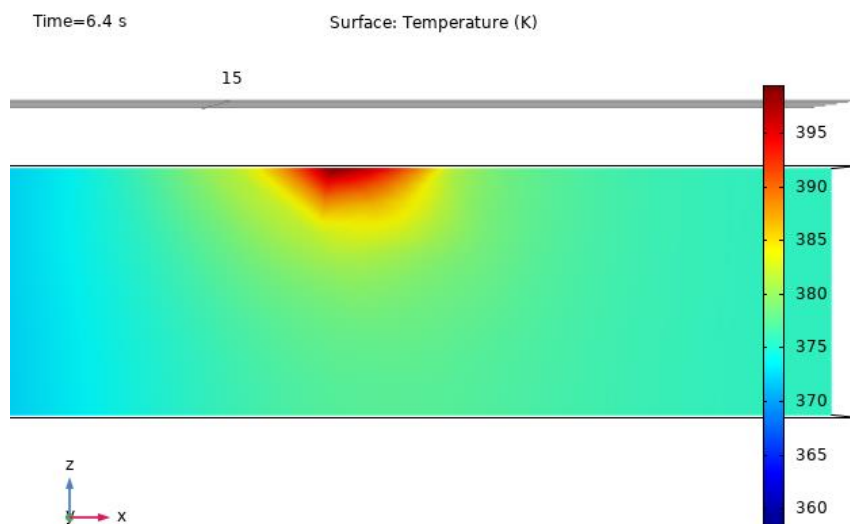


Рисунок 2.7 – Просторовий розподіл температури в перетині зразка молибдену

Отже, встановлені закономірності теплового впливу лазерного випромінювання на металеві зразки дозволяють встановити режими лазерної обробки металів, що необхідно для отримання визначених експлуатаційних характеристик зразків. Як видно з результатів розрахунків, відмінності в теплових характеристиках металів можуть досить суттєво впливати на температурний режим обробки навіть при однакових значеннях емісійної здатності.

Розглянемо далі взаємодію лазерного випромінювання з діелектричними матеріалами на прикладі кремнію та кварцу, які широко застосовуються в оптиці та квазіоптиці. Наприклад, ці матеріали застосовуються для формування планарних оптичних хвилеводів, де кварц використовується як підкладка для хвилеводного кремнієвого каналу. Різниця в показниках заломлення цих матеріалів дозволяє локалізувати електромагнітну енергію в хвилеводному каналі завдяки ефекту повного внутрішнього відбиття. В таблиці 2.7 представлені фізичні параметри кремнію, який також є вбудованим матеріалом в пакеті COMSOL.

Таблиця 2.7 – Параметри кремнію як вбудованого матеріалу

Material Contents				
	Property	Variat	Value	Unit
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant	Cp	700[J/(kg*K)]	J/(kg
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	2329[kg/m^3]	kg/m
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k_iso ;	130[W/(m*K)]	W/(m
	Relative permeability	mur_is	1	1
	Electrical conductivity	sigma	1e-12[S/m]	S/m
	Coefficient of thermal ex	alpha_	2.6e-6[1/K]	1/K
	Relative permittivity	epsilo	11.7	1
	Young's modulus	E	170e9[Pa]	Pa
	Poisson's ratio	nu	0.28	1

Звичайно, у порівнянні з металами кремній має значно меншу щільність і доволі високу теплоємність. Слід зазначити, що теплопровідність

кремнію мало відрізняється від молібдену. Крім того, кремній має набагато більшу емісійну здатність (табл. 2.8). Це дозволяє зробити припущення про наявність досить суттєвих відмінностей в теплових режимах між кремнієм та розглянутими раніше металами.

Таблиця 2.8 – Параметри моделі з кремнієвим зразком

Parameters			
Name	Expression	Value	Descr
slab_d	5 [mm]	0.005 m	
slab_h	2 [mm]	0.002 m	
slab_w	20 [mm]	0.02 m	
P	20 [W]	20 W	
speed	2.5 [mm/s]	0.0025 m/s	
spot	0.0005 [m]	5E-4 m	
time	slab_w/speed	8 s	
emmissivi	0.7	0.7	
tp	0.4[s]	0.4 s	
t_crit	1000 [degC]	1273.2 K	

Зокрема, в цьому випадку можна передбачити більш високу температуру нагріву зразка. Це пояснюється збільшеним значенням емісійної здатності, яка характеризує поглинання теплового випромінювання матеріалом. Але зростання температури нагріву буде частково компенсуватися за рахунок досить значної теплопровідності кремнію. Тобто тепла енергія буде досить швидко переноситися в об'ємі зразка.

Результати чисельних розрахунків підтверджують зроблені припущення. На рис. 2.8 представлена часова залежність температури верхньої поверхні зразка кремнію за час проходження лазерного променя уздовж цього зразка.

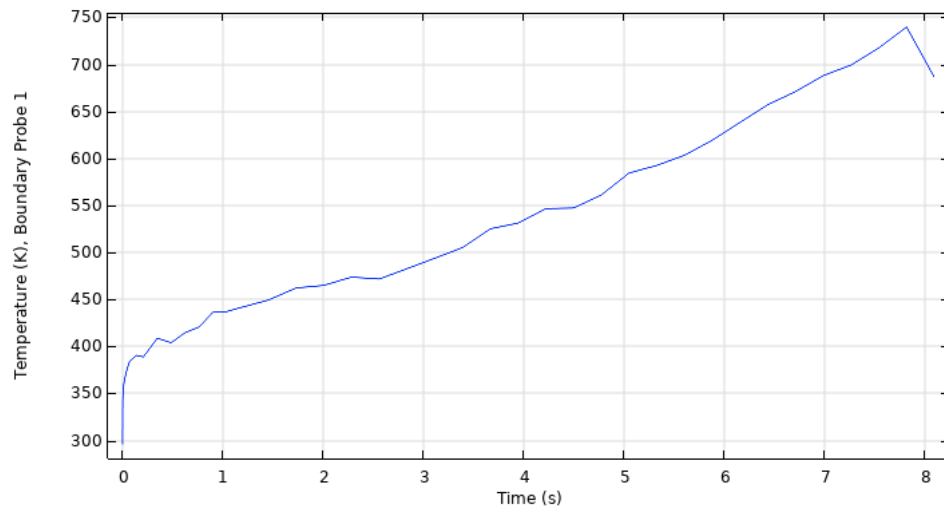


Рисунок 2.8 – Часова залежність температури верхньої поверхні зразка кремнію

Порівняння із результатами, отриманими за тих же умов для міді та молібдену, свідчить про зростання температури нагріву поверхні мінімум на 300 К. Але звертає на себе увагу зовнішня подібність отриманих часових залежностей для цих трьох матеріалів. Температура поверхні зростає майже за лінійним законом під час руху лазерного променя уздовж зразків. Це можна пояснити досить високими значеннями теплопровідності всіх трьох розглянутих матеріалів. Завдяки цьому нагрівання контрольованої поверхні лазерним променем під час його руху супроводжується відбиранням тепла від поверхні і його перетіканням в увесь об'єм зразків. Отже в даному випадку реалізується дія двох протилежних фізичних факторів – нагрівання поверхні та відводу тепла від неї. Отримані часові залежності температури поверхні зразків є результатом одночасної дії цих факторів.

Саме тому має сенс розглянути матеріал, характеристики якого кардинально відрізняються від характеристик розглянутих матеріалів. Оберемо для цього кварц. Цей матеріал також є вбудованим в пакет COMSOL і тому його основні характеристики враховуються автоматично в чисельних розрахунках. В таблиці 2.9 представлені фізичні параметри кварцу.

Таблиця 2.9 – Параметри кварцу як вбудованого матеріалу

Material Contents					
	Property	Variat	Value	Unit	Pr
<input checked="" type="checkbox"/>	Density	rho	2210[kg/m ³]	kg/m ³	Ba
<input checked="" type="checkbox"/>	Thermal conductivity	k_iso	1.4[W/(m*K)]	W/(m·K)	Ba
<input checked="" type="checkbox"/>	Heat capacity at constant	Cp	730[J/(kg*K)]	J/(kg·K)	Ba
	Relative permeability	mur_iso	1	1	Ba
	Electrical conductivity	sigma	1e-14[S/m]	S/m	Ba
	Relative permittivity	epsilo	4.2	1	Ba
	Refractive index, real part	n_iso	1.5	1	Re
	Refractive index, imaginary	ki_iso	0	1	Re

З наведених даних видно, що цей матеріал характеризується дуже малим значенням теплопровідності, що на два порядки менша, ніж у кремнію. Крім того, емісійна здатність кварцу перевершує значення для всіх розглянутих раніше матеріалів і сягає 0,9 (табл. 2.10).

Таблиця 2.10 – Параметри моделі з кварцовим зразком

Parameters			
Name	Expression	Value	De
slab_d	5 [mm]	0.005 m	
slab_h	2 [mm]	0.002 m	
slab_w	20 [mm]	0.02 m	
P	20 [W]	20 W	
speed	2.5 [mm/s]	0.0025 m/s	
spot	0.0005 [m]	5E-4 m	
time	slab_w/speed	8 s	
emmissivi	0.9	0.9	
tp	0.4[s]	0.4 s	
t_crit	1000 [degC]	1273.2 K	

Виходячи з наведених для кварцу параметрів, можна передбачити суттєвий нагрів верхньої поверхні зразка під час руху лазерного променя уздовж його. Цей висновок підтверджується результатами чисельних розрахунків, наведеними на рисунку 2.9.

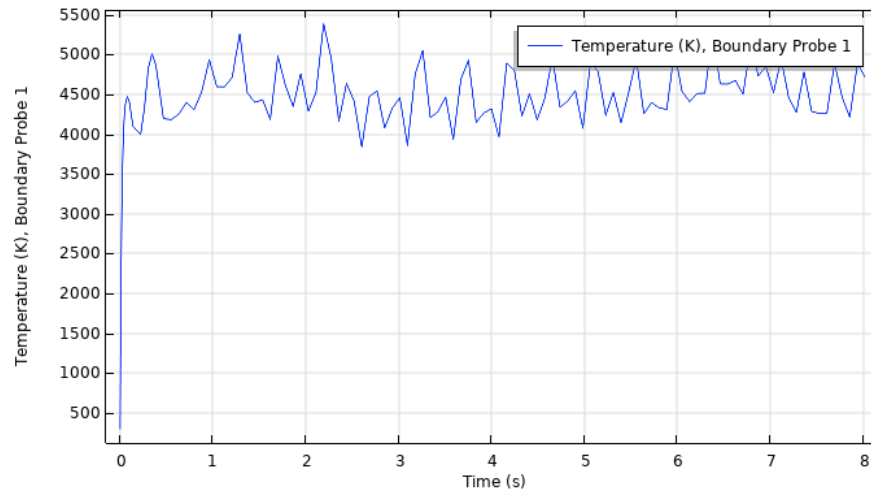


Рисунок 2.9 – Часова залежність температури верхньої поверхні зразка кварцу

З рисунку видно, що нагрівання поверхні зразка відбувається дуже швидко завдяки дуже низькій теплопровідності кварца та його високій емісійній здатності. Саме з цих причин також значно підвищується температура поверхні зразка, яка в даному випадку становить близько 4500 К. Слід зазначити, що така висока температура поверхні зразка може призводити до фазових переходів, які не враховуються в даній моделі. Тому треба обирати такі режими обробки зразків з низькою теплопровідністю, які б не призводили до топлення та випаровування матеріалу.

На рис. 2.10 представлені результати розрахунку просторового розподілу температури в зразку із кварцу. Природно, що у цьому випадку перепад температур між протилежними поверхнями зразка є дуже великим – кілька тисяч градусів.

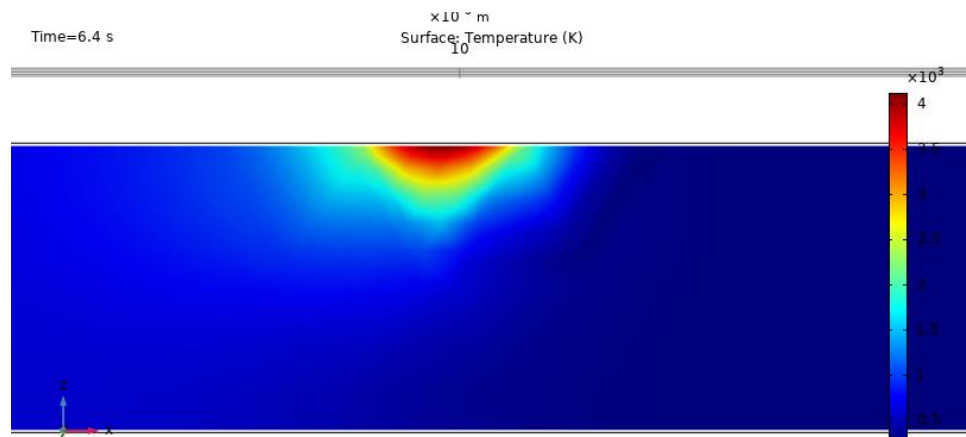


Рисунок 2.10 – Просторовий розподіл температури в перетині зразка кварцу

Отже, побудована в роботі модель теплової взаємодії лазерного випромінювання з різними матеріалами відображає основні фізичні закономірності процесів, що відбуваються під час руху лазерного променя уздовж досліджуваного зразка. Але слід уважно обирати режими обробки матеріалів та самі матеріали через обмеження у врахуванні фізичних механізмів, що супроводжують надмірне підвищення температури зразків.

ВИСНОВКИ

1. В кваліфікаційній роботі проведено аналіз літератури з дослідження взаємодії лазерного випромінювання з речовиною.
2. Проаналізовано пакет COMSOL Multiphysics, його можливості та особливості роботи з ним.
3. У пакеті COMSOL було створено програму, що моделює процес обробки матеріалів лазерним променем.
4. Доведено можливість моделювання лазерної обробки матеріалів, а також можливість моделювання розподілу тепла від лазера у глибині матеріалу.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Dzyubenko M. I., Maslov V. A., Odarenko E. N. Modelling of output mirrors based on circular gradient structures for THz lasers // Quantum Electronics. 2019. Vol. 49, No. 5. P. 512–513.
2. Dzyubenko M. I., Maslov V. A., Odarenko E. N., Radionov V. P. Prospects of Gradient Gratings Used in the Terahertz Lasers // Telecommunications and Radio Engineering. 2019. Vol. 78, No. 16. P. 1497–1507.
3. Климков Ю. М., Майоров В. С., Хорошев М. В. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, 2014. 89 с.
4. Лыков А. В. Теория теплопроводности. Москва: Высшая школа 1967. 600 с.
5. Мезенов А. В., Сомс Л. Н., Степанов А. И. Термооптика твердотельных лазеров. Ленинград: Машиностроение, 1986. 199 с.
6. Взаимодействие лазерного излучения с веществом, 2014. 45 с.
7. Галлагер Р. Метод конечных элементов. Основы. Москва: Мир, 1984. 428 с.
8. Вейко В. П., Либенсон М. Н. Лазерная обработка. Ленинград: Машиностроение, 1973. 191 с.
9. Бокуть В. В., Кондратенко В. С. и др. Термоупругие поля в твердых телах при его обработке лазерными пучками специальной формы. Минск: ИФ АН БССР, 1987. 59 с.
10. COMSOL Multiphysics Modeling Software. URL: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics> (дата звернення 17.10.2021).
11. Анализируйте тепловые процессы с помощью модуля Теплопередача. URL: <https://www.comsol.ru/heat-transfer-module> (дата звернення 20.11.2021).
12. Светушков Н. Н. Топологические принципы построения двумерных кластерных моделей: тезисы докл. совещ. зав. каф. Вузов России / под.ред. Г. Г.Спирина. Москва: АПР, 2009. С. 272–273.

13. Светушков Н. Н., Третьякова О.Н. О моделировании процессов лазерного нагрева поверхностей материалов // Приборы. 2009. № 8 (110). С. 59–63.