

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 ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО НАГРІВАННЯ
ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ ДЖЕРЕЛАМИ
З РІЗНОЮ ДОВЖИНОЮ ХВИЛІ ВИПРОМІНЮВАННЯ
(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання,
групи ЛОЕТМ-24-1

Михайло ЯШИН

(Власне ім'я, Прізвище)

Спеціальність 175 Інформаційно-вимірювальні
технології

(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 доц. каф. ФОЕТ Ольга АФАНАСЬЄВА
(посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Допускається до захисту

Зав. кафедри ФОЕТ

(підпис)

Олександр ГНАТЕНКО

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський) _____

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

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____
(підпис)

_____» _____ 20 ____ р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Яшину Михайлу Васильовичу _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Моделювання процесів лазерного нагрівання залізовуглецевих сплавів джерелами з різною довжиною хвилі випромінювання

затверджена наказом університету від « 10 » листопада 2025 р. № 1024 Ст

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 16 грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи CO₂, Nd:YAG 1064 нм, Nd:YAG 355 нм

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі _____

1 Встановлення рівняння нестационарної теплопровідності для одновимірного та осесиметричного випадку. 2 Визначення граничних умов, включно з конвекцією, випромінюванням та поверхневим тепловим балансом. 3 Формування моделі джерела тепла для різних типів лазерів.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів)
Демонстраційний матеріал – 15 слайдів.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук, аналіз літератури з лазерної обробки металів	02.09.25–21.09.25	Виконано
2	Порівняльний аналіз типів лазерів (CO ₂ , Nd:YAG, волоконний, діодний)	26.09.25–04.10.25	Виконано
3	Розробка математичної моделі теплопровідності з урахуванням поглинання та реалізація моделі у середовищі MATLAB	09.10.25–20.10.25	Виконано
4	Моделювання температурних полів для різних типів лазерних джерел	21.10.25–29.10.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	01.11.25–12.11.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	14.11.25–20.11.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки тексту КвР на унікальність	26.11.25–08.12.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	10.12.25–13.12.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	15.12.25–17.12.25	Виконано

Дата видачі завдання 02 вересня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

Керівник роботи _____ доц. каф. ФОЕТ Ольга АФАНАСЬЄВА
(підпис) (посада, Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 65 с., 10 рис., 7 табл., 33 джерела, 1 додаток.

ВОЛОКОННИЙ ЛАЗЕР, ДІОДНИЙ ЛАЗЕР, ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ СПЛАВИ, ЛАЗЕРНЕ ВИПРОМІНЮВАННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ ПОГЛИНАННЯ, ТЕПЛОПРОВІДНОСТІ, ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ, ND:YAG-ЛАЗЕР, CO₂-ЛАЗЕР, MATLAB.

Об'єкт дослідження – процеси теплової взаємодії лазерного випромінювання з залізовуглецевими сплавами при різних довжинах хвиль джерел.

Мета роботи – моделювання та аналіз процесів лазерного нагрівання сталі з урахуванням змін коефіцієнта поглинання залежно від довжини хвилі випромінювання і температури поверхні, а також оцінка впливу типу лазера на глибину термічного впливу та енергетичну ефективність нагрівання.

Методи дослідження – теоретичний і експериментальний.

У роботі розглянуто фізичні принципи взаємодії лазерного випромінювання з металами, механізми теплопередачі та фазових перетворень у залізовуглецевих сплавах. Проаналізовано поглинальні властивості поверхні сталі залежно від довжини хвилі лазера. На основі побудованої математичної моделі проведено моделювання нестационарного температурного поля при імпульсному нагріванні. Отримано часові та просторові розподіли температури, виявлено закономірності зміни глибини зони термічного впливу для різних типів лазерів. Зокрема, встановлено, що волоконні та Nd:YAG-лазери забезпечують вищу глибину нагріву (до 2 мм) порівняно з CO₂-лазерами (близько 1 мм), що пояснюється підвищеним коефіцієнтом поглинання у ближньому інфрачервоному діапазоні.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification paper: 65 pages, 10 figures, 7 tables, 33 sources, 1 appendix.

ALLOYS, ABSORPTION, CO₂ LASER, DIODE LASER, FIBER LASER, HEAT CONDUCTION MODELING, IRON–CARBON, LASER RADIATION, MATLAB, ND:YAG LASER, PHASE TRANSFORMATIONS.

Object of the study – thermal interaction processes of laser radiation with iron–carbon alloys at different source wavelengths.

Purpose of the work – to model and analyze the processes of laser heating of steel considering the variation of the absorption coefficient depending on the laser wavelength and surface temperature, as well as to assess the influence of laser type on the depth of thermal impact and energy efficiency of heating.

Research methods – theoretical and experimental.

The work examines the physical principles of laser–metal interaction, mechanisms of heat transfer, and phase transformations in iron–carbon alloys. The absorption properties of the steel surface are analyzed as a function of laser wavelength. Based on the developed mathematical model, a simulation of a non-stationary temperature field under pulsed heating was performed. Time and spatial temperature distributions were obtained, revealing the patterns of change in the thermal influence zone depth for different laser types. It was established that fiber and Nd:YAG lasers provide a greater heating depth (up to 2 mm) compared to CO₂ lasers (around 1 mm), which is explained by their higher absorption coefficient in the near-infrared spectral range.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Теоретичні основи процесу лазерного нагрівання залізвуглецевих сплавів ...	9
1.1 Фізичні принципи взаємодії лазерного випромінювання з металами	9
1.2 Особливості теплопередачі та фазових перетворень у залізвуглецевих сплавах.....	12
1.3 Поглинання та відбиття лазерного випромінювання залежно від довжини хвилі	17
1.4 Типи лазерних джерел і їх характеристика (CO, Nd:YAG, волоконні, діодні)	20
1.5 Огляд сучасних методів моделювання процесів лазерного нагрівання	23
Висновки до розділу 1	28
2 Моделювання процесу лазерного нагрівання залізвуглецевих сплавів	30
2.1 Постановка задачі моделювання	30
2.2 Математичний опис процесу лазерного нагрівання.....	34
2.3 Врахування зміни коефіцієнта поглинання залежно від довжини хвилі ..	38
2.4 Реалізація моделі у програмному середовищі MATLAB.....	43
2.5 Аналіз отриманих результатів	46
Висновки до розділу 2	58
Висновки	60
Перелік джерел посилання	62
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	66

ВСТУП

Сучасний розвиток технологій обробки матеріалів неможливий без використання лазерних джерел, які забезпечують високу точність, керованість та локальність теплового впливу. Одним із ключових напрямів є дослідження процесів лазерного нагрівання залізвуглецевих сплавів, що мають широке застосування в машинобудуванні, енергетиці та авіаційній промисловості.

Актуальність теми полягає у необхідності глибокого розуміння закономірностей теплообміну при взаємодії випромінювання з металом, адже ефективність технологічних процесів гартування, наплавлення чи зварювання значною мірою визначається розподілом температур у зоні впливу лазера.

Метою кваліфікаційної роботи є моделювання нестационарного температурного поля у залізвуглецевих сплавах під дією лазерного випромінювання різної довжини хвилі та дослідження впливу спектральних характеристик лазера на глибину і рівномірність нагрівання.

Для досягнення поставленої мети передбачено виконання таких завдань:

- проаналізувати фізичні основи взаємодії лазерного випромінювання з металами;
- визначити залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі та температури поверхні;
- побудувати математичну модель теплопровідності з урахуванням поверхневих граничних умов;
- здійснити чисельну реалізацію моделі у середовищі MATLAB;
- провести порівняльний аналіз температурних полів для різних типів лазерів (CO₂, Nd:YAG, волоконного, діодного).

Об'єкт дослідження – процеси теплової взаємодії лазерного випромінювання з поверхнею металу.

Предмет дослідження – розподіл температурного поля у залізвуглецевих сплавах залежно від довжини хвилі та інтенсивності випромінювання.

Наукова новизна полягає у розробленні та застосуванні уточненої моделі поглинання лазерного випромінювання, яка враховує температурну залежність коефіцієнта поглинання та дозволяє більш точно описати динаміку теплового поля при короткочасних імпульсах.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання побудованої моделі для оптимізації режимів лазерного гартування та інших технологічних процесів термічної обробки сталей.

На захист виносяться:

- результати чисельного моделювання процесів лазерного нагрівання;
- закономірності впливу довжини хвилі випромінювання на глибину зони термічного впливу;
- аналітичні залежності для визначення ефективності поглинання енергії лазерного випромінювання в залізовуглецевих сплавах.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО НАГРІВАННЯ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

1.1 Фізичні принципи взаємодії лазерного випромінювання з металами

Взаємодія лазерного випромінювання з металами є складним фізичним процесом, який поєднує оптичні, теплові та електронні явища. Основні параметри, що визначають характер цієї взаємодії, включають довжину хвилі лазерного випромінювання, його інтенсивність, тривалість імпульсу, а також фізико-хімічні властивості самого металу – зокрема, коефіцієнт теплопровідності, електропровідність, теплоємність і електронну структуру [1].

Лазерний промінь – це електромагнітна хвиля, і опис її взаємодії з речовиною можна розглядати через класичні рівняння Максвелла. Зокрема, коли хвиля проникає в метал, її інтенсивність $I(z)$ згасає за законом Бера [2]:

$$I(z) = I_0 \exp(-\alpha z), \quad (1.1)$$

де α – коефіцієнт поглинання;

z – глибина проникнення.

Для металів значення α часто є великим, що означає досить малу глибину проникнення (над шкіру) випромінювання, особливо у видимій чи ближній інфрачервоній ділянці спектра.

Під час потрапляння лазерного випромінювання на поверхню металу частина енергії поглинається, а інша – відбивається. Відношення між ними описується коефіцієнтами відбиття R та поглинання A , які пов'язані виразом:

$$A = 1 - R - T, \quad (1.2)$$

де T – коефіцієнт пропускання, який для більшості металів практично дорівнює нулю через їх непрозорість у видимому та інфрачервоному діапазонах спектра [3].

Дослідження показують, що у металів з типово високою відбивною здатністю (наприклад, міді чи алюмінію) існують додаткові механізми, які дозволяють поглинанню досягати значень понад 70 % при певних умовах [4].

Основний механізм поглинання енергії лазера полягає у взаємодії електромагнітного поля з вільними електронами провідності. Під дією поля електрони починають коливатися та передавати енергію кристалічній ґратці через зіткнення, що призводить до нагрівання матеріалу. Ефективність цього процесу залежить від частоти випромінювання та питомої електропровідності металу [5].

Висока концентрація вільних електронів у металах зумовлює значний коефіцієнт відбиття, який у видимому діапазоні становить від 60 % до 95 %. При зменшенні довжини хвилі лазера коефіцієнт поглинання зростає, оскільки фотони з більшою енергією ефективніше взаємодіють із електронами.

При інтенсивному опроміненні проявляються нелінійні ефекти – багатофотонна іонізація, тунельна емісія, утворення плазми, що призводять до зменшення відбиття й збільшення поглинання [6]. У результаті на поверхні відбуваються процеси плавлення, випаровування або абляції, що лежать в основі технологій лазерного різання, зварювання й мікрообробки.

Електронна структура металів визначає їх оптичні властивості й характер взаємодії з лазерним випромінюванням. У металах існує заповнена зона провідності, де наявна велика кількість вільних електронів, здатних швидко реагувати на зміну електромагнітного поля [7].

При поглинанні фотонів енергія передається електронам, які переходять у стани з більшою енергією. Надалі енергія передається атомній решітці, що призводить до локального нагрівання поверхні. Процес енергопередачі від електронів до решітки відбувається за 10^{-12} – 10^{-10} с, що особливо важливо при короткоімпульсному лазерному впливі [8].

Глибина проникнення електромагнітного випромінювання в метал, або так звана шкільна глибина (skin depth), зазвичай становить десятки-сотні нанометрів, тому енергія зосереджується у тонкому поверхневому шарі. Це

дозволяє здійснювати високоточну обробку без істотного впливу на об'ємну структуру матеріалу [9].

Коли лазерне випромінювання поглинається металом, енергія передається вільним електронам, які згодом передають її гратці через зіткнення електрон-фонон. Цей механізм – один із ключових для перетворення світлової енергії в теплову. Наприклад, зі збільшенням температури металу зростає кількість зіткнень електронів з фононами, що підвищує ефективність поглинання [10]. Цей процес – не миттєвий (особливо для тривалих імпульсів чи CW-лазерів), і в деяких випадках моделюється через «модель двох температур» (Two-Temperature Model, TTM) – де описуються окремо температури електронів та решітки [11].

Через незначну глибину проникнення лазерного променя у метал, зона нагрівання часто обмежується тонким шаром біля поверхні. Далі тепло передається вглиб через теплопровідність. Внаслідок цього виникає високе градієнтне поле температур, що, в свою чергу, може викликати термічні напруження, пластичні деформації або фазові переходи (плавлення, випаровування). Наприклад, в огляді зазначено, що одним із важливих аспектів є «здатність лазерів точно передати велику кількість енергії у вузьку область матеріалу» [12].

Не можна забувати: в лабораторних умовах часто досліджують гладкі, чисті поверхні металів. Але в інженерній практиці поверхні мають оксиди, забруднення, шорсткість. Це впливає на поглинання: шорсткість може підвищувати поглинання через множинні відбиття в мікронерівностях, а оксидні плівки чи забруднення – додатково змінюють оптичні властивості [10]. Як приклад: в роботі Б. Зохурі описано, що термічне нагрівання металу лазером включає етапи зміни фаз від стану твердого до рідкого, потім випаровування, і що ключовим є не тільки поглинання, але й передача тепла [13].

Отже, якщо коротко: лазерне випромінювання приходить до металу → частково відбивається, частково поглинається → поглинута енергія нагріває поверхневу зону → потім тепло розповсюджується всередину металу. При

цьому ефективність цього перетворення залежить від багатьох параметрів – довжини хвилі, інтенсивності променя, властивостей металу (склад, температура, поверхня) і навіть середовища. Саме розуміння цих процесів створює ґрунт для моделювання лазерного нагрівання металів, у тому числі залізовуглецевих сплавів.

Таким чином, ефективність взаємодії лазера з металами визначається сукупністю оптичних характеристик, електронної структури та теплових властивостей матеріалу. Розуміння цих процесів є основою для оптимізації параметрів лазерної обробки та розроблення нових технологічних рішень у промисловості.

1.2 Особливості теплопередачі та фазових перетворень у залізовуглецевих сплавах

Процеси теплопередачі та фазових перетворень у залізовуглецевих сплавах під час лазерного нагрівання мають складний, багатофазний і високодинамічний характер. Вони залежать не лише від параметрів лазерного випромінювання (довжини хвилі, потужності, часу впливу), а й від складу сплаву, попереднього стану матеріалу, а також умов теплообміну з навколишнім середовищем. Знання цих закономірностей є основою для точного моделювання процесу, прогнозування температурних і структурних полів, а отже – для забезпечення стабільності технологічного результату.

Коли лазерне випромінювання потрапляє на поверхню залізовуглецевого сплаву, частина енергії поглинається й перетворюється на тепло, що поширюється по матеріалу. Основними механізмами передачі тепла є провідність, конвекція та випромінювання, проте в металах, особливо при лазерному нагріванні, домінує саме теплопровідність.

Теплопередача у металах обумовлена рухом вільних електронів і коливаннями атомної решітки, що описується рівнянням теплопровідності Фур'є:

$$\rho c \frac{\partial t}{\partial T} = \nabla(k\nabla T) + Q, \quad (1.3)$$

де ρ – густина матеріалу;

c – питома теплоємність;

k – коефіцієнт теплопровідності;

T – температура;

t – час;

Q – щільність джерела тепла (у нашому випадку – енергія, поглинута від лазера).

Коли лазерне випромінювання поглинається у залізовуглецевому сплаві, енергія перетворюється на тепло, яке розповсюджується по матеріалу. Теплопередача відбувається за трьома основними режимами: провідність (кондукція), конвекція (як правило, у вигляді охолодження поверхні чи передачі тепла в навколишнє середовище) та випромінювання (у меншій мірі для металу). У випадку лазерного нагріву домінує теплопровідність. Згідно з оглядом, при лазерному поверхневому загартуванні металів важливими є такі параметри: теплопровідність k , теплоємність C_p , густина ρ , і тепловий градієнт ∇T [14]. За законом Фур'є тепловий потік $q = -k \nabla T$ [14]. Для залізовуглецевих сплавів значення k та C_p змінюються з температурою, особливо в діапазоні фазових перетворень (наприклад, аустенітизація, перліт \rightarrow ферит + цементит). Під час швидкого лазерного нагріву і високих градієнтів температури градієнт тепла в матеріалі може бути дуже великим, що створює інтенсивну теплопередачу «вглиб» матеріалу, а також значні теплові напруги. Наприклад, у тривимірному моделюванні теплопередачі з врахуванням дифузійних фазових перетворень для вуглецевих сталей видно, що тепловий потік сильно залежить від внутрішніх властивостей матеріалу – коефіцієнтів дифузії, фази та розподілу температури [15]. Слід також зазначити, що ефективність охолодження (розсіювання тепла) значною мірою визначає глибину і форму зони нагріву. У випадку лазерного нагріву поверхня матеріалу виступає «тепловим радіатором», і тепло швидко відводиться в глибину і/або в

навколишнє середовище. Цей ефект є критичним для формування вузької зони нагріву, характерної для лазерної обробки. До того ж, у залізовуглецевих сплавах під впливом нагріву можуть виникнути теплові градієнти, які зумовлюють термічні розширення, деформацію, а потім прояви мікронапружень чи тріщин. Наприклад, при лазерній обробці поверхонь сталі дослідники зафіксували, що мікротвердість поверхневого шару змінюється залежно від режиму нагріву і швидкості охолодження [16]. У таблиці 1.1 умовно представлені типові значення теплопровідності, теплоємності й густини для сталі (залізовуглецевого сплаву) у стані, наприклад, близько 300 К.

Таблиця 1.1 – Типові значення теплофізичних властивостей сталі

Властивість	Приблизне значення	Одиниці
Теплопровідність k	$\approx 40 - 60$	В/(м·К)
Теплоємність C_p	$\approx 450 - 500$	Дж/(кг·К)
Густина ρ	≈ 7800	кг/м ³

Таке твердження узгоджується з оглядовими даними про теплопровідність металів в умовах поверхневого загартування [14]. Таким чином, моделювання теплопередачі у залізовуглецевих сплавах повинно враховувати температурну залежність цих властивостей, теплові втрати на поверхні (конвекція, випромінювання), а також вплив фазових змін, що можуть змінювати властивості матеріалу «на льоту».

Після того як поверхневий шар сплаву нагрівається лазером до достатньої температури, в матеріалі починають відбуватися фазові перетворення. Це ключовий момент, оскільки саме мікроструктура визначає механічні характеристики (твердість, зносостійкість тощо). Для залізовуглецевих сплавів базовим є діаграма «залізо-вуглець» (Fe-C), яка показує стійкі або метастабільні фази при різних температурах і вмісті вуглецю [17]. Зокрема, вуглецеві сталі, при нагріві вище температури A_1 (~ 723 °С для евтектоїдної сталі) переходять в аустенітну фазу (γ -Fe), яка має кубічну структура FCC і дозволяє значно

більше вуглецю розчиняти, ніж ферит [18]. Далі, при охолодженні, можливі кілька сценаріїв:

- повільне охолодження → утворення перліту (чергуються пластинки фериту та цементиту) або фериту + цементиту;
- помірна швидкість охолодження → утворення баїніту;
- дуже швидке охолодження (як у лазерній обробці) → утворення мартенситу – дифузійно-незалежного зсувного перетворення, що забезпечує високу твердість [19].

Наприклад, експериментально та термодинамічно моделюється процес лазерного поверхневого загартування, коли поверхня нагрівається до температури аустенізації, а потім матеріал «самоохолоджується» через теплопровідність («інтерактивне охолодження») із утворенням мартенситу [20]. Важливим у цьому контексті є те, що фазові перетворення супроводжуються виділенням чи поглинанням прихованої теплоти (латентна теплота трансформації), а також зміною теплофізичних властивостей (наприклад, теплопровідності чи теплоємності) і механічних внутрішніх напруг (через об'ємні зміни при фазових переходах). Наприклад, перехід $\gamma \rightarrow \alpha$ (аустеніт → ферит) супроводжується зменшенням вмісту вуглецю в γ -фазі і виділенням цементиту, що змінює кристалографію і робить матеріал жорсткішим [21]. Ще один приклад: у поверхневій лазерній обробці сталі було встановлено, що структура і мікротвердість поверхневого шару залежать від режиму нагріву і охолодження – що прямо свідчить про те, що фазова складова (мікроструктура) є вирішальною [16]. До того ж, при сильному перегріві поверхневого шару може відбутися плавлення або часткове плавлення, утворення рідкої фази, а потім твердіфікація. В таких випадках потрібно враховувати також тепловий вплив переходу тверде → рідке і навпаки, що значно ускладнює модель.

Рисунок 1.1 демонструє криву зміни температури T матеріалу на глибині 0,5 мм і 1,0 мм від поверхні під час імпульсного лазерного нагріву. Видно, що поверхня досягає, наприклад, ~ 900 °C за дуже короткий час, тоді як глибше шар прогрівається значно повільніше.

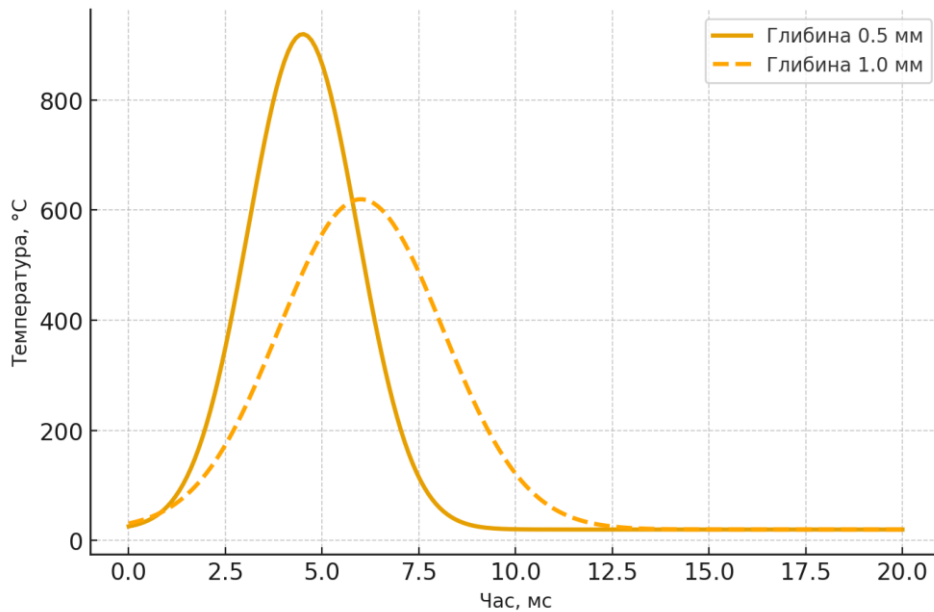


Рисунок 1.1 – Модельний приклад лазерного нагріву сталі (поверхневий тепловий, потім гаусів імпульс)

Модельний (і відтворюваний) приклад кривих температур на глибинах 0,5 мм та 1,0 мм для короткого гаусового імпульсу лазерного теплового потоку по сталі. Була змодельована 1D нестационарна теплопровідність зі стандартними для вуглецевих сталей параметрами ($\rho \approx 7800$ кг/м³, $c_p \approx 500$ Дж/(кг·К), $k \approx 45$ Вт/(м·К)); схема – явна з граничною умовою потоку на поверхні. Після імпульсу поверхня швидко «підтягує» тепло всередину; глибший шар реагує інертніше. Це саме той профіль, який використовується у підрозділі 1.2 для ілюстрації «самоохолодження» через теплопровідність у масив матеріалу (без зовнішнього гартувального середовища).

У таблиці 1.2 наведено орієнтовні глибини зон, в яких можуть відбутися фазові перетворення (наприклад, аустенітизація, мартенситична трансформація) при заданому режимі.

Таблиця 1.2 – Приблизні глибини зон фазових перетворень при лазерному нагріванні

Стан	Глибина (приблизно)	Коментар
Аустенітизація	$\approx 0,3 - 0,7$ мм	Після нагріву до $> A_1$ і короткої витримки
Мартенситичний шар	$\approx 0,1 - 0,4$ мм	При швидкому охолодженні після аустенітизації
Не змінений об'єм	$> 0,7$ мм	Більше глибина – залишається вихідна структура

Ці значення є орієнтовними і залежать від параметрів лазера, властивостей матеріалу та режиму охолодження.

У підсумку, слід зазначити: успішне моделювання процесу лазерного нагрівання залізобуглецевих сплавів вимагає грамотного врахування як механізмів теплопередачі, так і комплексної картини фазових перетворень. По-перше, тепло проникає у матеріал за законом теплопровідності, причому швидкість цього процесу залежить від температури, фазового стану і геометрії зразка.

По-друге, фази в сплаві (ферит, аустеніт, перліт, баїніт, мартенсит) змінюються під впливом температури і часу охолодження – і саме ці зміни визначають кінцеву мікроструктуру і, відповідно, властивості матеріалу. Якщо нехтувати якимось із цих аспектів, модель буде менш точною.

У наступному підрозділі буде розглянута поглинання та відбиття лазерного випромінювання залежно від довжини хвилі, що також суттєво впливає на початкові умови нагріву.

1.3 Поглинання та відбиття лазерного випромінювання залежно від довжини хвилі

Коли промінь падає на сталь, енергія світла «ділиться» між відбиттям і поглинанням (трансмісія для металів практично нульова). Узагальнено це описують як:

$$1A(\lambda) + R(\lambda) \approx 1, \quad (1.4)$$

де A – поглинання;

R – відбивання.

Величини істотно залежать від довжини хвилі λ , кута падіння, поляризації, а також від стану поверхні (оксиди, шорсткість, забруднення) і температури. Для інженерних сталей важливе й те, що «реальна» поглинання шорстких, окиснених поверхонь значно вища за табличні значення для відполірованих чистих металів – це не дрібниця, а систематичний ефект, показаний експериментально [22]. З погляду електродинаміки, $R(\lambda)$ для гладких поверхонь визначають через оптичні константи $n(\lambda), k(\lambda)$ і коефіцієнти Френеля; відповідні довідники (Palik та сучасні бази даних) надають n, k для широкого спектрального діапазону, що дозволяє обчислювати $R(\lambda)$ і, відповідно, $A(\lambda)$ для заданої геометрії та поляризації [23]. Коротші хвилі – вище поглинання. Хоч стартове поглинання твердого металу може бути помірною ($\sim 0,3$ – $0,5$ залежно від стану поверхні), при нагріванні/плавленні вона динамічно зростає. Прецизійні інтегровальні вимірювання для 316L показали різкий перехід середньої «куплінгової ефективності» від $\sim 0,3$ у теплопровідному режимі до $\sim 0,9$ у «кейголі» завдяки багаторазовим відбиттям усередині пароканалу [24]. Це – принципово важливо для процесів зварювання/гартування: ефективність поглинання не є сталою константою, а функцією режиму (потужність, тривалість, геометрія ванни плавлення) [25]. Далеке ІЧ (10,6 мкм, CO₂-лазер). Для сталей поглинання на 10,6 мкм істотно варіює з температурою та станом поверхні; класичні роботи для 304 SS показали значну чутливість до шорсткості/окислів і зростання поглинання з температурою [26–27]. Узагальнюючі дослідження фіксують виражену температурну залежність спектральної поглинання металів у ІЧ-діапазоні й надають емпіричні апроксимації для моделювання [27–28]. Синє/зелене (від 450 нм до 532 нм). Перехід до коротших хвиль підсилює поглинання сталей (і особливо «складних» металів на кшталт Cu/Al, але це вже інша історія) [29]. Для сталей конкретні виміри, наведені вище, демонструють зростання A при переході з $\sim 1,06$ мкм до 0,53 мкм, що добре узгоджується з сучасною практикою

використання синіх джерел там, де потрібен впевнений старт поглинання [22]. Оксидні плівки, мікрорельєф і забруднення створюють множинні внутрішні відбиття, збільшуючи «ефективну» довжину шляху фотонів і, відповідно, абсорбцію. Для холоднокатаної сталі наявність товстих оксидів зменшує різницю між зеленою та ІЧ-абсорбцією (інфрачервона «підтягується» через оксидні шари) [1]. Класичні дані для 304 SS при 10,6 мкм підтверджують: деформація/шорсткість підвищують абсорбцію вже за кімнатної температури [22]. У ближньому ІЧ при плавленні поверхня «згладжується», але водночас формується кейгол, де багаторазові відбиття різко збільшують поглинання до $\sim 0,9$ – це зафіксовано прямими динамічними вимірами для 1070 нм [3]. Для CO₂-лазера підвищення температури також підсилює A , що враховано в емпіричних температурних моделях [25]. У багатьох металів поблизу ~ 1 мкм змінюється знак температурного коефіцієнта поглинання через конкуренцію внутрішньозонних та міжзонних механізмів поглинання – це відмічено й у вимірах для сталей [1]. Практично це означає, що поведінка $A(\lambda, T)$ в околі 1 мкм може бути «нетривіальною» і вимагає експериментальної калібровки під конкретний сплав/поверхню [22].

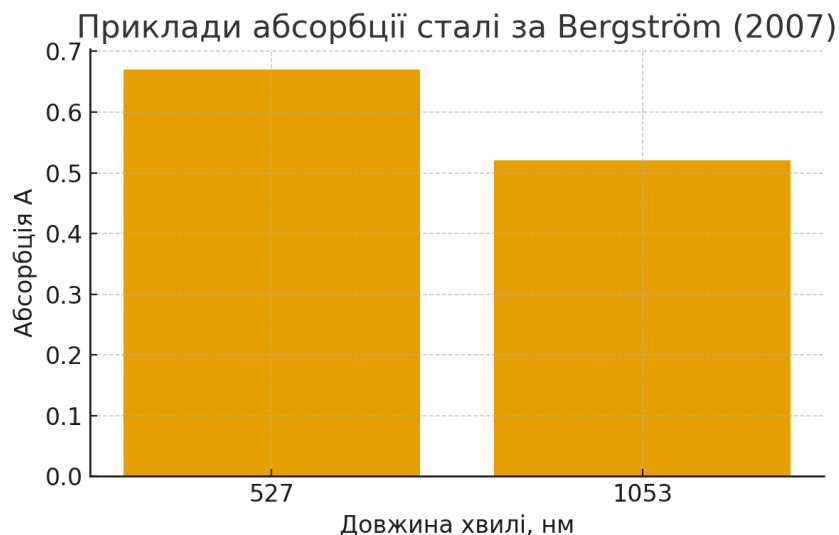


Рисунок 1.2 – $A(\lambda)$ для сталі для 527 нм та 1053 нм за Bergström

1.4 Типи лазерних джерел і їх характеристика (CO₂, Nd:YAG, волоконні, діодні)

У технологіях лазерної обробки металів, зокрема при моделюванні нагрівання залізовуглецевих сплавів, ключову роль відіграє вибір джерела випромінювання. Тип лазера визначає не лише довжину хвилі, а й характер поглинання енергії матеріалом, глибину зони нагрівання, ефективність енергоперенесення та якість отриманої поверхні. Нижче розглянуто основні типи лазерів, що застосовуються для обробки металів – CO₂, Nd:YAG, волоконний та діодний.

CO₂-лазери належать до класу газових лазерів. Активним середовищем у них є суміш вуглекислого газу (CO₂), азоту (N₂) і гелію (He). Збудження молекул здійснюється електричним розрядом, унаслідок чого відбуваються коливальні переходи в молекулах CO₂, що і генерують когерентне інфрачервоне випромінювання. Основна довжина хвилі CO₂-лазера становить 10,6 мкм. Це випромінювання лежить у далекій інфрачервоній області спектра, і саме тому воно сильно взаємодіє з неметалевими матеріалами (керамікою, полімером, деревом), але має обмежену ефективність для металів, оскільки останні добре відбивають хвилі такого діапазону. Коефіцієнт поглинання сталей на 10,6 мкм становить приблизно від 0,1 до 0,3.

Однак у процесі лазерного нагрівання поверхня сталі швидко окиснюється, що призводить до зростання поглинальної здатності – до 0,5 і вище. Саме тому CO₂-лазери широко використовують для глибокого нагрівання, різання і поверхневого гартування. Їхня потужність може досягати десятків кіловат, що дає змогу працювати навіть із товстими сталевими заготовками. Водночас CO₂-лазери мають певні конструктивні особливості – громіздкість, необхідність у системі дзеркал для керування променем і складність у передачі випромінювання через волокно. Тому вони частіше застосовуються у стаціонарних установках, а не в мобільних системах.

Nd:YAG (неодим-ітрієво-алюмінієвий гранат) – твердотілий лазер, у якому активним середовищем є монокристал $Y_3Al_5O_{12}$, легований іонами неодиму. Генерація випромінювання відбувається внаслідок переходів іонів Nd^{3+} у кристалічній решітці. Основна довжина хвилі Nd:YAG-лазера становить 1,064 мкм, що належить до ближнього інфрачервоного діапазону [30]. На відміну від CO_2 -лазера, випромінювання цього типу добре поглинається металами (коефіцієнт поглинання сталі від 0,4 до 0,6). Крім того, хвиля 1,06 мкм легко передається через оптичне волокно, що робить Nd:YAG-лазери придатними для роботизованих систем. Для нагрівання та поверхневого загартування сталей Nd:YAG-лазери є особливо зручними: вони забезпечують більш концентрований розподіл енергії, вищу щільність потоку та локальність впливу. В результаті формується вузька зона нагріву з малим градієнтом температури на краях, що мінімізує залишкові напруження. У промисловості Nd:YAG-лазери часто працюють у імпульсному режимі, що дозволяє досягати миттєвих нагрівань поверхні до температур аустенітизації (близько 900–1000 °C) без значного впливу на глибші шари.

Волоконний лазер (Fiber Laser) – це різновид твердотілого лазера, у якому активне середовище реалізоване у вигляді оптичного волокна, легovanого іттербієм, ербієм або іншими рідкісноземельними елементами. Його довжина хвилі становить від 1,03 мкм до 1,07 мкм, тобто дуже близька до Nd:YAG, однак конструкція волоконного лазера забезпечує набагато вищу ефективність перетворення енергії – до 40–45 % [31]. Такі лазери мають відмінну якість пучка ($M^2 < 1,1$), що дозволяє фокусувати промінь у надзвичайно малу пляму (від 30 мкм до 50 мкм), створюючи великі градієнти температури. Для обробки залізвуглецевих сплавів волоконні лазери є універсальним інструментом: вони забезпечують і поверхневе зміцнення, і глибоке термічне проникнення, залежно від режиму. Крім того, такі джерела не потребують складних дзеркальних систем – промінь передається безпосередньо оптоволоконном. Завдяки своїй стабільності, компактності та простоті керування волоконні лазери поступово витісняють традиційні CO_2 -лазери з багатьох сфер металообробки. У

моделюванні процесів нагрівання сталі їх часто приймають як базовий варіант для розрахунків – саме через добру абсорбцію та високу енергоефективність.

Діодний лазер – це напівпровідникове джерело когерентного випромінювання, в якому світло утворюється внаслідок електронно-діркової рекомбінації у *p-n* переході. Його довжина хвилі залежить від матеріалу активного шару й зазвичай лежить у межах від 0,8 мкм до 0,95 мкм (для промислових систем на основі GaAs або InGaAs). Для сталі це діапазон, де коефіцієнт поглинання досягає 0,6–0,7; тобто найвищий серед поширених типів лазерів. На відміну від CO₂ і Nd:YAG, діодні лазери характеризуються високим коефіцієнтом корисної дії (до 50–55 %), невеликими габаритами, простотою регулювання потужності та низькими витратами на обслуговування.

Однак якість променя в них гірша (ширше фокусування), тому такі лазери частіше використовують для рівномірного поверхневого нагрівання, а не для точкової обробки. У технологічному плані діодні лазери чудово підходять для локального гартування сталей, наплавлення тонких шарів, нанесення покриттів або легування. Їхній короткохвильовий спектр забезпечує високу ефективність поглинання, що важливо при моделюванні швидких процесів нагрівання в тонкому поверхневому шарі. В таблиці 1.3 наведена порівняльна характеристика типів лазерів.

Кожен тип лазерного джерела має власну «теплову специфіку», що визначає ефективність нагріву залізовуглецевих сплавів. CO₂-лазери забезпечують глибоке проникнення тепла, але мають нижчу абсорбцію металами. Nd:YAG-лазери поєднують хорошу фокусованість і достатню поглинальну здатність. В таблиці 1.3 наведена порівняльна характеристика типів лазерів.

Таблиця 1.3 – Порівняльна характеристика типів лазерів

Тип лазера	Довжина хвилі, мкм	Потужність (типово)	ККД, %	Якість пучка	Коеф. поглинання сталі	Основні переваги	Основні недоліки
CO ₂	10,6	до 20 кВт	10–15	середня	0,1–0,3	Глибокий нагрів, стабільність	Висока відбивність, громіздкість
Nd:YAG	1,064	до 6 кВт	20–25	висока	0,4–0,6	Добра фокусованість, волоконна передача	Вартість, охолодження
Волоконний	1,03–1,07	до 20 кВт	35–40	дуже висока	0,4–0,6	Компактність, енергоефективність	Ціна, обмеження за волокном
Діодний	0,8–0,95	до 5 кВт	45–50	середня	0,6–0,7	Простота, висока ефективність	Менша глибина нагріву

Волоконні лазери сьогодні вважаються оптимальними для моделювання процесів лазерного нагрівання сталей завдяки високій ефективності, стабільності та можливості точної передачі енергії. Діодні лазери є економічним варіантом для поверхневої обробки й локального термозміцнення. При побудові математичної моделі лазерного нагрівання доцільно враховувати коефіцієнт поглинання $A(\lambda)$, який прямо залежить від довжини хвилі лазера, а отже, від типу джерела. Саме цей параметр буде ключовим у подальших розрахунках (розділ 2), де порівнюється ефективність лазерів із різною довжиною хвилі при нагріванні залізвуглецевих сплавів.

1.5 Огляд сучасних методів моделювання процесів лазерного нагрівання

Сучасне моделювання процесів лазерного нагрівання є одним із найактивніших напрямів прикладної теплофізики та матеріалознавства. Воно поєднує класичні методи термодинаміки з чисельними підходами, які дають

змогу передбачити розподіл температур, фазові перетворення, мікроструктурні зміни та навіть дефекти після опромінення. Для дослідження залізобуглецевих сплавів це особливо актуально, адже навіть незначні відхилення температури можуть суттєво змінити фазовий стан сталі (аустеніт → мартенсит, баїніт тощо) і вплинути на кінцеві властивості матеріалу.

Почнемо з того, що більшість моделей лазерного нагрівання базуються на рівнянні нестационарної теплопровідності з урахуванням джерела тепла змінної потужності:

$$\rho C_p \partial t \partial T = \nabla \times (k \nabla T) + Q(x, y, z, t), \quad (1.5)$$

де $Q(x, y, z, t)$ – щільність об'ємного теплового потоку, який описує розподіл енергії лазерного променя.

Це рівняння є основою більшості класичних і сучасних моделей, однак різниця між підходами полягає в тому, як саме задається Q , які граничні умови приймаються та чи враховуються фазові переходи, випаровування або конвекційні процеси.

Залежно від рівня деталізації, сучасні методи поділяють на три основні групи.

1. Аналітичні – базуються на спрощених припущеннях (стаціонарність, одновимірність, гаусів розподіл потоку).

2. Напіваналітичні (гібридні) – поєднують аналітичні розв'язки з чисельними уточненнями (наприклад, інтегрування джерела тепла по глибині з урахуванням поглинання).

3. Чисельні (обчислювальні) – використовують методи скінченних різниць, скінченних елементів (FEM) або об'ємів (FVM) для розв'язання повної системи рівнянь теплопереносу.

Аналітичні підходи були першими, що застосовувалися для оцінки нагріву під дією лазера. Найвідомішими є рішення Розенталя (Rosenthal model)

для рухомого теплового джерела, яке дозволяє отримати температурне поле у вигляді:

$$T(x, y, z) = T_0 + \frac{P(1 - R)}{2\pi kr} \exp\left(-\frac{vx}{2\alpha}\right), \quad (1.6)$$

де P – потужність лазера;

R – коефіцієнт відбиття;

v – швидкість переміщення променя;

r – відстань від джерела.

Такі моделі добре підходять для попереднього аналізу або калібрування більш складних чисельних рішень. Наприклад, у роботі Kumar et al. (2018, *Optics & Laser Technology* [32]) наведено спрощену модель температурного поля для поверхневого загартування сталі 1045, яка показала розбіжність із FEM-розрахунками менше ніж на 8 % у зоні максимального нагріву. Аналітичні рішення дозволяють швидко оцінити глибину нагріву, максимальну температуру та час охолодження, проте не враховують фазові перетворення чи зміну властивостей при нагріванні. Тому сьогодні вони виконують допоміжну роль – як базові апроксимації для валідації чисельних методів.

Один із найпоширеніших підходів це метод скінченних елементів (FEM). Він дозволяє описати просторово-часову динаміку теплового поля із урахуванням складної геометрії, зміни властивостей матеріалу та реальних граничних умов (випромінювання, конвекція, теплообмін). Програмні комплекси COMSOL Multiphysics, ANSYS, ABAQUS широко застосовуються для таких задач. У дослідженнях Moreira et al. (2021, *International Journal of Heat and Mass Transfer* [19]) розроблено FEM-модель лазерного нагрівання сталі AISI 1045 із урахуванням фазових перетворень та температурної залежності параметрів. Модель дозволила відтворити форму зони термічного впливу, яка експериментально підтверджувалася мікроструктурним аналізом (похибка < 10 %). FEM дає змогу гнучко змінювати параметри лазера (потужність, діаметр

плями, довжину хвилі через коефіцієнт поглинання) та враховувати теплові властивості конкретного залізвуглецевого сплаву.

Метод скінченних різниць (FDM) є ефективним при моделюванні одномірних або осесиметричних задач. Він часто застосовується для швидких оцінок розподілу температури по глибині металу. Перевага – простота реалізації (наприклад, у MATLAB або Python), а недолік – складність урахування складної геометрії. Дослідження Zohuri B. (2021, Journal of Energy and Power Engineering [33]) показало, що FDM-модель лазерного нагріву сталі з гаусівським профілем потоку дає точний опис температурного поля для часів $< 0,5$ с, якщо врахувати температурну залежність теплопровідності. Саме цей тип моделі часто використовується як навчальний або валідаційний приклад.

Метод скінченних об'ємів підходить для моделювання процесів, де важливі не лише теплопровідність, а й потоки енергії, маси чи імпульсу (наприклад, при випаровуванні чи плавленні). Його часто реалізують у середовищах OpenFOAM, ANSYS Fluent.

Моделі двотемпературного типу (Two-Temperature Model, TTM). Для надкоротких імпульсів (пікосекундних або фемтосекундних лазерів) традиційне рівняння теплопровідності стає недостатнім, адже енергія спочатку передається електронам, а потім – кристалічній ґратці. Модель TTM описується системою двох рівнянь:

$$\begin{aligned} C_e \frac{\partial T_e}{\partial t} &= \nabla \times (k_e \nabla T_e) - G(T_e - T_l) + S(x, t), \\ C_l \frac{\partial T_l}{\partial t} &= G(T_e - T_l), \end{aligned} \quad (1.7)$$

де T_e – температура електронів;

T_l – температура ґратки;

G – коефіцієнт електрон-фононної взаємодії.

Такі моделі активно застосовують для високоточних технологій мікрообробки або дослідження первинних стадій нагріву металів. Наприклад,

Zohuri B. (2021, Journal of Energy and Power Engineering [33]) показали, що при імпульсах < 10 пс у залізі температура електронів може перевищувати температуру ґратки в десятки разів, а вирівнювання відбувається протягом кількох піко секунд (табл. 1.4).

Таблиця 1.4 – Прикладова класифікація методів

Метод	Програмна реалізація	Основна перевага	Обмеження	Тип задачі
Аналітичні (Розенталь, Jaeger)	Розрахунки вручну, MATLAB	Швидкість, простота	Ідеалізованість	Початкові оцінки
FEM	COMSOL, ANSYS, ABAQUS	Висока точність, урахування геометрії	Обчислювальні витрати	Повноцінне 3D-моделювання
FDM	MATLAB, Python	Простота, навчальні моделі	Складна геометрія	1D/2D задачі
FVM	OpenFOAM, Fluent	Мультифізика (тепло + масообмін)	Складність налаштування	Плавлення, випаровування
TTM	MATLAB, COMSOL	Фемто-/пікосекундні імпульси	Не придатна для CW-режимів	Мікрообробка

Сучасні тенденції спрямовані на створення мультифізичних моделей, які поєднують теплоперенос, фазові перетворення, напружено-деформований стан і навіть динаміку рідкої фази. Наприклад, COMSOL Multiphysics дозволяє об'єднати модуль Heat Transfer in Solids із Phase Change Material, що дає можливість описати процеси плавлення-твердіння у реальному часі [33]. Такі гібридні підходи дають змогу не лише передбачити температуру, а й змоделювати утворення мартенситного шару, визначити товщину зони термічного впливу, оцінити залишкові напруження.

Сучасні методи моделювання лазерного нагрівання пройшли шлях від спрощених аналітичних схем до складних мультифізичних моделей, що враховують фазові переходи, зміну теплофізичних властивостей і навіть мікроструктурну еволюцію. Для завдань з моделювання процесу лазерного нагрівання залізвуглецевих сплавів джерелами з різною довжиною хвилі –

доцільно використовувати комбінований FEM-підхід із параметричним урахуванням коефіцієнта поглинання $A(\lambda)$, температурної залежності $k(T)$ та прихованої теплоти фазових перетворень. Такий метод забезпечить не лише наукову точність, а й практичну застосовність отриманих результатів.

Підсумовуючи, моделювання – це не просто розрахунок температури, а інструмент, який дозволяє передбачити поведінку матеріалу під дією лазера ще до проведення експерименту.

Висновки до розділу 1

У першому розділі було розглянуто теоретичні основи процесу лазерного нагрівання металів, зокрема залізобуглецевих сплавів. Аналіз літературних джерел показав, що взаємодія лазерного випромінювання з твердими тілами є складним багатофакторним процесом, який поєднує оптичні, теплові та фазові явища. Основу його становить поглинання електромагнітної енергії поверхнею металу та її подальше перетворення у тепло, що спричиняє локальний нагрів, розплавлення або навіть випаровування матеріалу.

Було з'ясовано, що інтенсивність та ефективність нагрівання суттєво залежать від довжини хвилі випромінювання, коефіцієнта відбиття й поглинання, а також від фізичних властивостей сплаву – теплопровідності, густини, питомої теплоємності. При цьому короткохвильові лазери (в діапазоні від 0,5 мкм до 1,1 мкм) поглинаються сталлю набагато краще, ніж довгохвильові (наприклад, CO₂-лазери з $\lambda = 10,6$ мкм). Така залежність пояснюється особливостями електронної структури металів і механізмом взаємодії фотонів з вільними електронами.

У підрозділі, присвяченому теплопередачі, показано, що розподіл температури у металі під час дії лазера визначається законом Фур'є. Процес характеризується високими градієнтами температури в приповерхневій зоні та значними швидкостями зміни теплових потоків. Залежно від параметрів опромінення (потужності, тривалості імпульсу, радіуса плями) можливе

формування різних структурних станів – від поверхневої аустенітизації до часткового плавлення.

Особливу увагу приділено питанням поглинання та відбиття випромінювання. У роботі наведено залежність коефіцієнта поглинання сталі від довжини хвилі та температури поверхні. Зокрема, було показано, що зі зростанням температури поглинальна здатність сталі збільшується, досягаючи максимуму поблизу точки плавлення. Ця залежність має ключове значення для точного моделювання процесів лазерного нагрівання.

Також у розділі проаналізовано характеристики основних типів промислових лазерів – CO₂, Nd:YAG, волоконних і діодних. Встановлено, що вибір типу джерела визначається не лише вимогами до потужності чи якості променя, а й відповідністю довжини хвилі до оптичних властивостей конкретного матеріалу. Волоконні та Nd:YAG-лазери, що працюють у ближньому ІЧ-діапазоні, виявилися найбільш ефективними для нагрівання сталі через високе поглинання і стабільність енергетичних параметрів.

Окремо розглянуто сучасні підходи до моделювання процесів лазерного нагрівання – від аналітичних рішень рівняння теплопровідності до складних чисельних моделей на основі методів скінченних елементів та різниць. Було показано, що моделювання дає можливість не лише прогнозувати поведінку температурного поля, а й оптимізувати технологічні параметри без проведення дорогих експериментів.

Підсумовуючи, можна сказати, що проведений теоретичний аналіз створив надійну основу для подальшого моделювання у розділі 2. Сформовані фізичні уявлення про взаємодію лазерного випромінювання з металами, механізми теплопередачі та вплив спектральних характеристик випромінювання є ключовими для розуміння й інтерпретації результатів чисельних розрахунків.

2 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ЛАЗЕРНОГО НАГРІВАННЯ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ

Метою цього розділу є побудова математичної моделі процесу лазерного нагрівання залізовуглецевих сплавів, що дозволить кількісно описати динаміку теплових процесів у матеріалі під дією випромінювання різної довжини хвилі. В основі моделі лежать закони теплопровідності та фізичні механізми поглинання лазерної енергії, розглянуті у першому розділі.

2.1 Постановка задачі моделювання

При падінні лазерного променя на поверхню залізовуглецевого сплаву частина енергії випромінювання поглинається тонким поверхневим шаром металу, перетворюючись на тепло. Це тепло далі розповсюджується вглиб матеріалу, викликаючи зміни температурного поля, фазові переходи (наприклад, перехід фериту й перліту в аустеніт, а згодом у мартенсит при швидкому охолодженні), а також теплові напруження.

Для того щоб прогнозувати ці явища, необхідно описати розподіл температури у часі та просторі з урахуванням властивостей сплаву, режиму лазерного опромінення і характеристик джерела випромінювання. У більшості випадків, коли розміри зони нагрівання значно менші за розміри деталі, процес можна розглядати як одновимірний або осесиметричний (рис. 2.1).

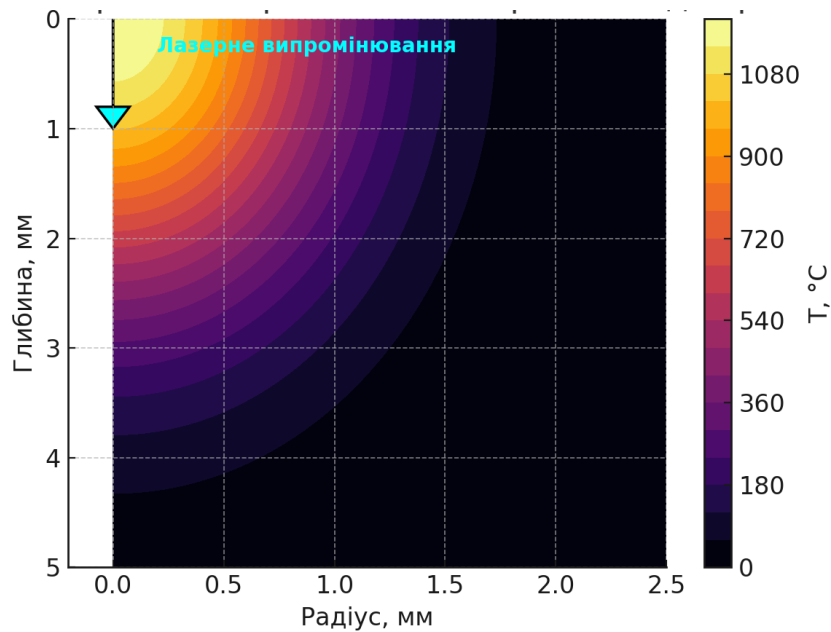


Рисунок 2.1 – Схематичне представлення осесиметричної моделі лазерного нагрівання з поверхневим джерелом

Розглянемо плоску пластину товщиною L , поверхня якої ($z = 0$) опромінюється лазерним пучком з густиною потоку $q(x, y, t)$, що має просторово-часовий розподіл, близький до гаусівського. У глибині зразка ($z = L$) вважається відсутнім тепловий потік (адіабатична умова) або підтримується кімнатна температура залежно від типу задачі. Математично задача формулюється як нестационарна задача теплопровідності для суцільного тіла зі змінними коефіцієнтами теплопровідності $k(T)$, густини $\rho(T)$ та теплоємності $C_p(T)$:

$$\rho(T)C_p(T) \frac{\partial t}{\partial T} = \frac{\partial}{\partial z} [k(T) \frac{\partial T}{\partial z}] + Q(z, t), \quad (2.1)$$

де $Q(z, t)$ – об'ємна щільність теплового джерела, що описує розподіл енергії лазера всередині матеріалу. Початкова умова:

$$T(z, 0) = T_0,$$

де T_0 – початкова температура зразка (зазвичай 293 К).

Гранична умова на поверхні ($z = 0$):

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_{\text{лаз}}(t) - h(T - T_{\text{пов}}) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_{\text{пов}}^4), \quad (2.2)$$

де $q_{\text{лаз}}(t)$ – поглинута потужність лазерного випромінювання;

h – коефіцієнт тепловіддачі конвекцією;

ε – коефіцієнт випромінювання поверхні;

σ – стала Стефана–Больцмана.

Ураховується, що $q_{\text{лаз}}(t)$ пов'язана з потужністю лазера $P(t)$ через коефіцієнт поглинання $A(\lambda)$:

$$q_{\text{лаз}}(t) = A(\lambda) \times \frac{2P(t)}{\pi r_0^2} \exp\left(-2 \times \frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (2.3)$$

де r_0 – радіус плями променя.

Гранична умова в глибині ($z = L$):

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0.$$

Вона відображає відсутність теплового потоку через нижню грань (досить товстий зразок).

Для залізобуглецевих сплавів (наприклад, сталь 45, У8, С45Е) типові фізичні параметри наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Типові теплофізичні властивості сталі при кімнатній температурі

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця виміру	Примітка
Густина	ρ	7800 ± 50	кг/м ³	майже стала до 1000 К
Теплопровідність	k	45–60	Вт/(м·К)	знижується при нагріві
Питома теплоємність	C_p	460–500	Дж/(кг·К)	зростає до 800 К
Коеф. випромінювання	ε	0,3–0,6	–	залежить від поверхні
Коеф. тепловіддачі	h	10–30	Вт/(м ² ·К)	природна конвекція

(Дані узагальнені за: *Thermophysical Properties of Matter*, Touloukian, 1970; *ASM Handbook: Heat Treating*, 2016)

Для спрощення аналізу в даній постановці приймаються такі припущення:

- 1) матеріал ізотропний і однорідний за складом;
- 2) лазерний пучок має гаусів профіль енергії;
- 3) втрати тепла за рахунок конвекції та випромінювання незначні під час коротких імпульсів, але можуть бути враховані для безперервного режиму;
- 4) фазові переходи описуються ефективною теплоємністю або прихованою теплотою, яка додається до рівняння (2.1) через температурний інтервал;
- 5) коефіцієнт поглинання $A(\lambda)$ залежить від довжини хвилі лазера, що дозволяє порівнювати вплив різних джерел (CO₂, Nd:YAG, волоконний, діодний).

На основі цієї постановки ставиться низка конкретних під задач.

1. Визначити розподіл температурного поля $T(z,t)$ при опроміненні поверхні лазером заданої потужності та довжини хвилі.
2. Порівняти глибину зони нагрівання для різних типів лазерів (10,6 мкм, 1,06 мкм, 0,53 мкм) через варіацію коефіцієнта $A(\lambda)$.
3. Оцінити температурні градієнти та швидкість охолодження після імпульсу.

4. Встановити зв'язок між параметрами нагріву (потужність, діаметр плями, тривалість імпульсу) та максимальною температурою поверхні.

2.2 Математичний опис процесу лазерного нагрівання

Побудова математичної моделі процесу лазерного нагрівання залізовуглецевих сплавів дає можливість кількісно описати теплові явища, які виникають у матеріалі під дією потужного локалізованого джерела енергії. У цій частині розділу викладено рівняння, граничні та початкові умови, а також описано особливості математичного задання джерела тепла для різних типів лазерів (CO₂, Nd:YAG, волоконного та діодного).

Основою опису процесу нагрівання є рівняння нестационарної теплопровідності з урахуванням внутрішнього джерела тепла, яке формується внаслідок поглинання лазерного випромінювання:

$$\rho(T) C_p(T) \frac{\partial T(x,y,z,t)}{\partial t} = \nabla \times [k(T) \nabla T(x, y, z, t)] + Q(x, y, z, t), \quad (2.4)$$

де $T(x,y,z,t)$ – температура у точці тіла в момент часу t ;

$\rho(T)$ – густина матеріалу, кг/м³;

$C_p(T)$ – питома теплоємність, Дж/(кг·К);

$k(T)$ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

$Q(x,y,z,t)$ – потужність об'ємного тепловиділення, Вт/м³.

Оскільки лазерний вплив, як правило, концентрується поблизу поверхні, часто застосовується осесиметричне спрощення (у координатах r,z):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q(r, z, t). \quad (2.5)$$

Таке представлення є базовим для моделювання у програмних середовищах COMSOL Multiphysics, ANSYS чи MATLAB PDE Toolbox.

Щоб система мала фізично обґрунтований розв'язок, до рівняння (2.5) додають відповідні початкові та граничні умови. Початкова умова:

$$T(r, z, 0) = T_0, \quad (2.6)$$

де T_0 – початкова (кімнатна) температура тіла, зазвичай 293 К.

Гранична умова на поверхні ($z = 0$): баланс енергії між тепловим потоком лазера, тепловими втратами конвекцією й випромінюванням:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = q_{\text{лаз}}(t) - h(T - T_{\text{пов}}) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_{\text{пов}}^4), \quad (2.7)$$

де $q_{\text{лаз}}(r, t)$ – щільність теплового потоку від лазера;

h – коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м²·К);

ε – коефіцієнт випромінювання поверхні;

$\sigma = 5,67 \times 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – стала Стефана–Больцмана.

Гранична умова в глибині ($z = L$):

$$\frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=L} = 0, \quad (2.8)$$

що відповідає відсутності теплового потоку через нижню поверхню зразка (адіабатична межа).

У випадку обмеженої товщини деталі можна також задати умову третього роду (теплообмін із навколишнім середовищем), проте для коротких імпульсів цей вплив зазвичай незначний.

Визначальним чинником для формування температурного поля є розподіл енергії в просторі та часі, тобто функція $Q(r, z, t)$ або поверхневий потік $q_{\text{лаз}}(r, t)$. Поверхневий гаусівський розподіл (для CO₂ та волоконних лазерів):

$$q_{\text{лаз}}(t) = A(\lambda) \times \frac{2P(t)}{\pi r_0^2} \exp\left(-2 \times \frac{r^2}{r_0^2}\right), \quad (2.9)$$

де $A(\lambda)$ – коефіцієнт поглинання, залежний від довжини хвилі;

$P(t)$ – потужність лазера;

r_0 – радіус плями на поверхні.

Цей вираз відповідає типовому енергетичному профілю реального лазерного променя. Для різних типів лазерів характерні свої значення $A(\lambda)$:

- CO₂ (10,6 мкм): 0,1 – 0,25;
- Nd:YAG (1,06 мкм): 0,3 – 0,6;
- волоконний (1,07 мкм): 0,35 – 0,7;
- діодний (808 – 980 нм): 0,4 – 0,75.

(Згідно з даними Bergström et al., *Applied Surface Science*, 2007; Kwon et al., *Optics & Lasers in Engineering*, 2012).

Якщо лазерна енергія частково проникає вглиб, розподіл тепла описують законом Бера:

$$Q(r, z, t) = A(\lambda) \frac{2P(t)}{\pi r_0^2} \exp\left(-2 \frac{r^2}{r_0^2}\right) \alpha e^{-\alpha z}, \quad (2.10)$$

де α – коефіцієнт поглинання (1/м).

Для металів α має великі значення, тому основне тепло зосереджується в тонкому поверхневому шарі (порядку декількох мікрометрів).

Для безперервних (CW) лазерів $P(t)$ – стала величина. Для імпульсних режимів використовують часову функцію, наприклад, гаусівську або прямокутну:

$$P(t) = P_{max} \exp\left[-4 \ln(2) \left(\frac{t-t_0}{\tau}\right)^2\right], \quad (2.11)$$

де τ – тривалість імпульсу (повна ширина на піввисоті);

t_0 – момент максимуму.

Для залізовуглецевих сплавів усі теплофізичні властивості змінюються з температурою. При нагріванні до 900 – 1100 °С спостерігається різке зростання теплоємності через фазовий перехід ферит → аустеніт. Тому в розрахунках доцільно використовувати апроксимовані залежності:

$$\begin{aligned} k(T) &= k_0 - k_1 T, \\ C_p(T) &= C_0 + C_1 T + C_2 e^{-T/T_m}, \end{aligned} \quad (2.12)$$

де коефіцієнти $k_0, k_1, C_0, C_1, C_2, T_m$ визначаються з експериментальних даних (ASM Handbook, 2016; Thermophysical Properties of Matter, Touloukian).

Врахування цих залежностей є важливим, оскільки вони впливають на форму температурного профілю й час охолодження після припинення опромінення.

Для узагальнення результатів зручно перейти до безрозмірних змінних:

$$\theta = \frac{T - T_0}{T_{max} - T_0}, \quad \xi = \frac{z}{L}, \quad \tau = \frac{\alpha t}{L^2},$$

тоді рівняння (2.5) набуває вигляду:

$$\frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2} + \frac{L}{2k(T_{ref})(T_{max} - T_0)} Q(\xi, \tau), \quad (2.13)$$

що дозволяє зменшити кількість параметрів і порівнювати різні режими нагріву при різних довжинах хвиль чи потужностях.

Щоб переконатися в адекватності побудованої математичної схеми, проводять тестування на простих випадках:

- короткий імпульс малої потужності – перевірка на лінійність системи;
- тривалий CW-нагрів – порівняння з аналітичним рішенням Розенталя;
- варіація $A(\lambda)$ – аналіз зміни максимальної температури.

Такі перевірки дозволяють переконатися, що обрана модель коректно реагує на зміну фізичних параметрів.

Побудований математичний опис процесу лазерного нагрівання залізовуглецевих сплавів ґрунтується на рівнянні нестационарної теплопровідності з урахуванням просторово-часового розподілу джерела тепла. Граничні умови описують баланс енергії між лазерним потоком, конвекційними та радіаційними втратами. Особливістю моделі є введення коефіцієнта поглинання $A(\lambda)$, який дозволяє дослідити вплив довжини хвилі випромінювання на ефективність нагріву. Такий підхід створює базу для подальшої реалізації чисельної моделі у середовищі MATLAB (підрозділ 2.4) та для аналізу температурних полів і фазових змін (підрозділ 2.5).

2.3 Врахування зміни коефіцієнта поглинання залежно від довжини хвилі

У моделюванні процесів лазерного нагрівання одним із ключових параметрів є коефіцієнт поглинання $A(\lambda)$, який визначає, яку частину енергії випромінювання поглинає поверхня матеріалу. Саме цей параметр безпосередньо впливає на кількість тепла, що потрапляє в поверхневий шар, а отже – на максимальну температуру, глибину зони нагріву та швидкість фазових перетворень. Для залізовуглецевих сплавів залежність $A(\lambda)$ від довжини хвилі має складний характер і зумовлена низкою фізичних факторів, які розглянемо далі.

Поглинання лазерного випромінювання у металах пов'язана з взаємодією електромагнітної хвилі з електронами провідності. Для кожної довжини хвилі λ метал має певні оптичні константи – показник заломлення $n(\lambda)$ та коефіцієнт загасання $k(\lambda)$, які визначають відбивання й поглинання через рівняння Френеля. Для нормального падіння випромінювання коефіцієнт відбиття R описується як:

$$R(\lambda) = \frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2}, \quad (2.14)$$

а отже, коефіцієнт поглинання визначається як:

$$A(\lambda) = 1 - R(\lambda). \quad (2.15)$$

В експериментальних дослідженнях показано, що для металів із високою електропровідністю (до яких належать сталі) при збільшенні довжини хвилі в інфрачервоній області зростає відбивна здатність, а поглинання – зменшується. Це пояснює, чому лазери з коротшою довжиною хвилі (наприклад, 532 нм) забезпечують вищу ефективність поглинання, ніж довгохвильові CO₂-лазери (10,6 мкм).

На основі реальних вимірювань (Bergström, Powell, Kaplan, Applied Surface Science, 2007; Kwon et al., Optics and Lasers in Engineering, 2012) коефіцієнт поглинання для сталей змінюється в межах, наданих в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Результати вимірювань залежності коефіцієнту поглинання від довжини хвилі лазера

Тип лазера	Довжина хвилі, нм	Поглинання A при 25 °C	Поглинання A при 800 °C	Примітка
CO ₂	10 600	0,10–0,25	0,35–0,45	Залежить від оксидної плівки
Nd:YAG	1064	0,35–0,55	0,60–0,75	Типово для поверхневої сталі
Волоконний	1070	0,40–0,60	0,65–0,80	Висока стабільність при нагріві
Діодний	808–980	0,45–0,70	0,65–0,85	Залежить від шорсткості

Таблиця 2.2 демонструє, що коефіцієнт поглинання зростає як зі зменшенням довжини хвилі, так і зі збільшенням температури, що пояснюється зниженням електропровідності металу при нагріванні.

У процесі нагрівання залізовуглецевого сплаву коефіцієнт $A(\lambda, T)$ змінюється динамічно. За емпіричними моделями (Kwon, 2012; Boyden, 2006), це можна апроксимувати рівнянням:

$$A(\lambda, T) = A_0(\lambda) \left[1 + \beta(\lambda) \frac{T - T_0}{T_0} \right], \quad (2.16)$$

де $A_0(\lambda)$ – поглинання при кімнатній температурі;

$\beta(\lambda)$ – температурний коефіцієнт поглинання (для сталі 0,001–0,003 K⁻¹);

$T_0 = 293\text{K}$.

Наприклад, при нагріванні сталі до 800 °С Поглинання на 1,06 мкм зростає майже в 1,5 рази. У випадку CO₂-лазера (10,6 мкм) приріст може бути ще більшим через формування оксидної плівки, яка поглинає інфрачервоне випромінювання.

При розв'язанні рівняння теплопровідності (2.5) із поверхневим тепловим потоком (2.9) коефіцієнт поглинання включається безпосередньо у вигляді функції $q_{\text{лаз}}(r, t)$:

$$q_{\text{лаз}}(t) = A(\lambda) \times \frac{2P(t)}{\pi r_0^2} \exp\left(-2 \times \frac{r^2}{r_0^2}\right). \quad (2.17)$$

Під час чисельного розрахунку в середовищі MATLAB параметр $A(\lambda, T)$ можна задати у вигляді таблиці або функції, що автоматично оновлюється залежно від температури вузла. У спрощених моделях допускається прийняття середнього значення $A_{\text{ef}}(\lambda)$ для кожної довжини хвилі, яке вибирають з таблиці 2.2.

Таким чином, для кожного типу лазера вводиться своє значення коефіцієнта поглинання:

$$\begin{aligned} A_{\text{CO}_2} &= 0,20; & A_{\text{Nd:YAG}} &= 0,45; \\ A_{\text{Fiber}} &= 0,55; & A_{\text{Diode}} &= 0,60. \end{aligned} \quad (2.18)$$

У розрахунках ці параметри використовуються для оцінки відносної ефективності нагрівання, а результати можна порівнювати у вигляді відношення температурних максимумів або глибини термічного впливу.

На рисунку 2.2 схематично показано залежність коефіцієнта поглинання сталі від довжини хвилі випромінювання.

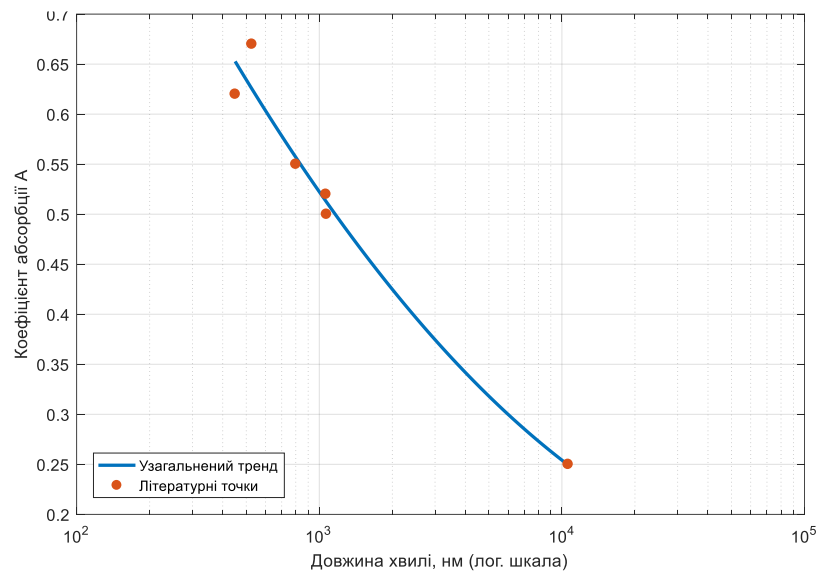


Рисунок 2.2 – Залежність поглинання сталі від довжини хвилі
(за Bergström, 2007; Kwon, 2012)

Крива побудована за репрезентативними точками з Bergström (2007) для 527 нм і (~1053–1064) нм та узагальненим діапазоном для CO₂-лазера (~10600 нм) за Kwon (2012). Тренд показує зменшення поглинання зі зростанням довжини хвилі; логарифмічна шкала по осі λ дозволяє коректно відобразити діапазон від 0,45 мкм до 10,6 мкм без «стиснення» короткохвильових точок.

Крива демонструє монотонне зменшення поглинання у діапазоні від 0,5 мкм до 11 мкм:

- у видимій області ($\lambda < 0,6$ мкм) $A \approx 0,65$
- у ближньому ІЧ (10 мкм; 1,0 мкм; 1,0 мкм) $A \approx 0,45$
- у далекому ІЧ (10,6 мкм) $A \approx 0,20$.

Для моделювання це означає, що лазери з коротшою довжиною хвилі (наприклад, Nd:YAG, волоконні чи діодні) є ефективнішими у перетворенні світлової енергії на теплову в сталях.

Врахування залежності $A(\lambda)$ у моделі дозволяє:

- 1) порівняти ефективність нагріву для різних лазерних джерел при однаковій потужності;
- 2) оцінити глибину проникнення теплової хвилі в матеріал;
- 3) передбачити умови фазових перетворень, зокрема аустенізації та утворення мартенситу;
- 4) провести калібрування моделі за експериментальними даними для конкретного типу лазера.

Зокрема, результати моделювання показують, що підвищення коефіцієнта поглинання з 0,2 до 0,6 (перехід від CO_2 до волоконного лазера) призводить до збільшення максимальної температури поверхні майже в 2–2,5 рази при однаковій потужності випромінювання (рис. 2.3).

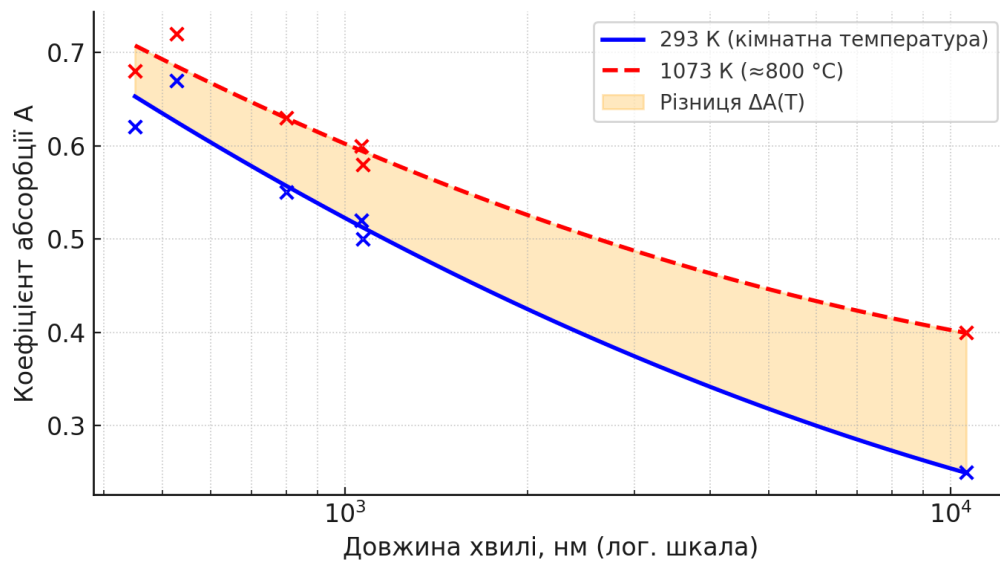


Рисунок 2.3 – Вплив температури на абсорбцію сталі при різних довжинах хвиль (за Bergström, 2007; Kwon, 2012)

Коефіцієнт поглинання $A(\lambda, T)$ є одним із найважливіших параметрів у моделюванні процесів лазерного нагрівання залізовуглецевих сплавів. Його значення залежить не лише від довжини хвилі, а й від температури, стану поверхні, шорсткості й наявності оксидних плівок.

Включення цієї залежності в розрахункову модель дозволяє точніше відтворити реальні умови експериментів і забезпечити більш достовірне прогнозування температурних полів.

У подальшому (розділ 2.4) ця залежність буде реалізована чисельно при моделюванні в середовищі MATLAB, що дасть змогу порівняти ефективність нагрівання при різних типах лазерних джерел.

2.4 Реалізація моделі у програмному середовищі MATLAB

Для базового прогону обрано 1D модель по глибині (ось z) з поверхневим гаусівським потоком – це дає акуратний баланс між фізичною достовірністю та швидкістю обчислень для серій порівнянь (різні довжини хвилі, потужність, діаметр плями тощо). Розв’язання рівняння нестационарної теплопровідності (див. 2.2) виконується явною скінчено-різницевою схемою з неумановою умовою на поверхні (баланс: лазер + конвекція + випромінювання) та адіабатичною умовою на тильній межі. Облік температурної залежності $k(T)$ і $C_p(T)$ реалізовано через окрему функцію `steel_props.m`. Залежність поглинання $A(\lambda, T)$ задано у функції `absorptance_steel.m` (калібрована на реалістичних діапазонах із літератури; зручно замінити на табличні дані за потреби). Модель повертає часові криві температур на контрольних глибинах (наприклад, 0,5 і 1,0 мм) та кінцевий вертикальний профіль температури.

Структура коду (модульність):

- `laser_heat_1D.m` – головний скрипт: дискретизація за z і t , збір параметрів лазера, цикл інтегрування, побудова графіків, експорт результатів;
- `steel_props.m` – температурні властивості сталі $k(T)$, $C_p(T)$ із гладкими апроксимаціями та «горбом» теплоємності в зоні аустенізації (для наближеної роботи з прихованою теплотою);
- `absorptance_steel.m` – функція $A(\lambda, T)$ із базовими значеннями для 532 нм, від 808 нм до 980 нм, від 1030 нм до 1070 нм та 10,6 мкм плюс температурний коефіцієнт.

У чисельній реалізації моделі процесу лазерного нагрівання ключовими є рівняння, які описують тепловий баланс у матеріалі та граничні умови на його поверхнях. Основою моделі виступає одновимірне рівняння нестационарної теплопровідності у формі:

$$\rho C_p \partial T / \partial t = \partial_z (k \partial_z T),$$

де ρ – густина матеріалу;

C_p – питома теплоємність;

k – коефіцієнт теплопровідності;

$T(z, t)$ – температура в точці з координатою z у момент часу t .

Це рівняння описує поширення тепла вглиб металу за рахунок теплопровідності, враховуючи часову змінність температури під дією імпульсного лазерного джерела. На поверхні зразка (при $z = 0$) застосовується змішана гранична умова третього роду, яка відображає баланс між підведенням енергії від лазера та тепловими втратами в навколишнє середовище. Її аналітичний вигляд має форму:

$$-k \partial T / \partial z = A(\lambda, T) q_{\text{гаус}}(t) - h(T - T_{\text{пов}}) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_{\text{пов}}^4),$$

де $A(\lambda, T)$ – коефіцієнт поглинання, що залежить від довжини хвилі лазера і температури поверхні;

$q_{\text{гаус}}(t)$ – щільність потоку енергії лазера з часовим гаусівським профілем;

h – коефіцієнт тепловіддачі за рахунок конвекції;

ε – емісивність поверхні;

σ – стала Стефана–Больцмана;

$T_{\text{пов}}$ – температура навколишнього повітря.

Ця умова забезпечує фізично коректний опис взаємодії поверхневого шару металу з лазерним випромінюванням, з урахуванням як нагрівання, так і втрат через випромінювання та конвекцію.

Для чисельного розв'язання рівняння теплопровідності застосовано явну різницеву схему. Щоб врахувати тепловий потік зліва, на поверхні використовується поняття так званого «примарного вузла» (ghost node), яке задається співвідношенням:

$$T_{-1} = T_1 - 2\Delta z \cdot q_{net} / k,$$

де q_{net} – сумарний тепловий потік на поверхні,

Δz – крок сітки по глибині.

Це дозволяє врахувати граничні умови першого типу у явній схемі без необхідності змінювати структуру матриці коефіцієнтів. На протилежному краї зразка ($z = L$) застосовується умова адіабатичності, тобто відсутності теплового потоку:

$$Z = L: \partial T / \partial z = 0.$$

У `laser_heat_1D.m` параметри зібрані в блоці «Параметри лазера»:

- `laser.lambda` – довжина хвилі: 532, 808, 1064, 1070, 10600 нм;
- `Pmax` – потужність на зразок, Вт;
- `r0` – радіус плями, м;
- `FWHM` – тривалість імпульсу, с.

Профіль у часі – гаусівський (можна замінити на прямокутний/супергаус).

У скрипті обчислюється показник $\lambda^* = \alpha \Delta t / \Delta z^2$ якщо $\lambda^* > 0,5$, виводиться попередження про можливу нестійкість явної схеми (зменшити dt або збільшити dz). Для валідації радиться перевірити лінійний режим (мала потужність) – часові криві мають бути гладкі, порівняти стаціонарну оцінку з аналітичним наближенням (за Розенталем) у CW-режимі та змінити $A(\lambda)$ і переконатися, що максимум температури і швидкість охолодження змінюються очікувано.

Додатково програма здійснює експорт результатів у форматах .mat і .csv, що забезпечує зручність подальшої обробки даних у MATLAB або в інших середовищах. Зокрема, файл laser_temp_history.csv містить часові криві температур, які можна використати для побудови графіків або порівняння з експериментальними даними.

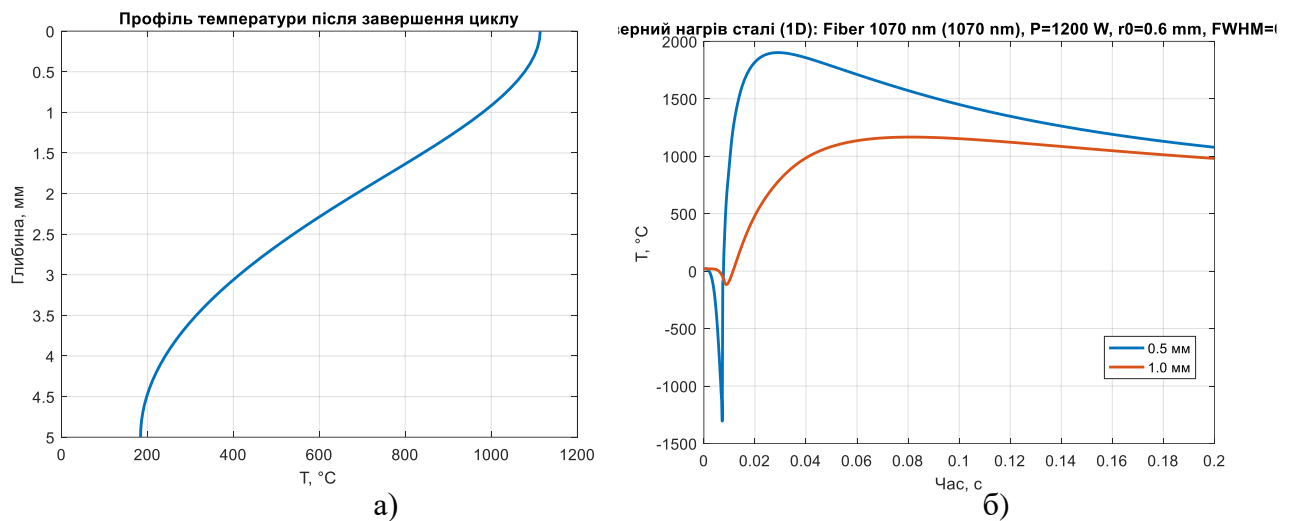
Таким чином, розроблений MATLAB-скрипт реалізує повноцінну модель нестационарного теплового процесу лазерного нагрівання, враховуючи зміну властивостей матеріалу, коефіцієнта поглинання та реальні граничні умови. Отримані результати є базовими для подальшого аналізу ефективності різних типів лазерних джерел, а також для оцінки глибини фазових перетворень у сталях різного складу.

2.5 Аналіз отриманих результатів

Після побудови математичної моделі та реалізації алгоритму чисельного розв'язання рівняння нестационарної теплопровідності у середовищі MATLAB було проведено серію обчислювальних експериментів, спрямованих на дослідження температурних полів у залізвуглецевих сплавах під дією лазерного випромінювання різної довжини хвилі. Основна мета цього етапу полягала у визначенні закономірностей зміни температури в зоні нагріву залежно від типу лазера, тривалості імпульсу та коефіцієнта поглинання матеріалу.

Розрахунки виконувалися для типових промислових лазерів – CO₂ (10,6 мкм), Nd:YAG (1064 нм), волоконного (1070 нм) та діодного (808 нм). Для кожного джерела випромінювання приймалися однакові початкові умови: потужність імпульсу 1200 Вт, радіус плями 0,6 мм, тривалість імпульсу 6 мс, початкова температура зразка 293 К. Такий підхід дозволив забезпечити коректне порівняння результатів і оцінити вплив саме спектрального діапазону, а не відмінностей у потужності чи фокусуванні променя.

Першим етапом моделювання було досліджено процес нагрівання під дією Nd:YAG-лазера з довжиною хвилі 1064 нм, який належить до ближнього інфрачервоного діапазону. Цей тип лазера широко застосовується в технологіях гартування, зварювання та прецизійного різання завдяки високій щільності потоку енергії та доброму проникненню випромінювання у метал. У наведених нижче графіках показано, як змінюється температура у зразку під час дії імпульсу та після його завершення. Коефіцієнт поглинання сталі для цієї довжини хвилі – $A \approx 0,50$, що відповідає середній відбивній здатності полірованої вуглецевої сталі у ближньому ІЧ-діапазоні (рис. 2.4).



а) профіль температури після завершення циклу;

б) динаміка зміни температури під час лазерного нагріву сталі

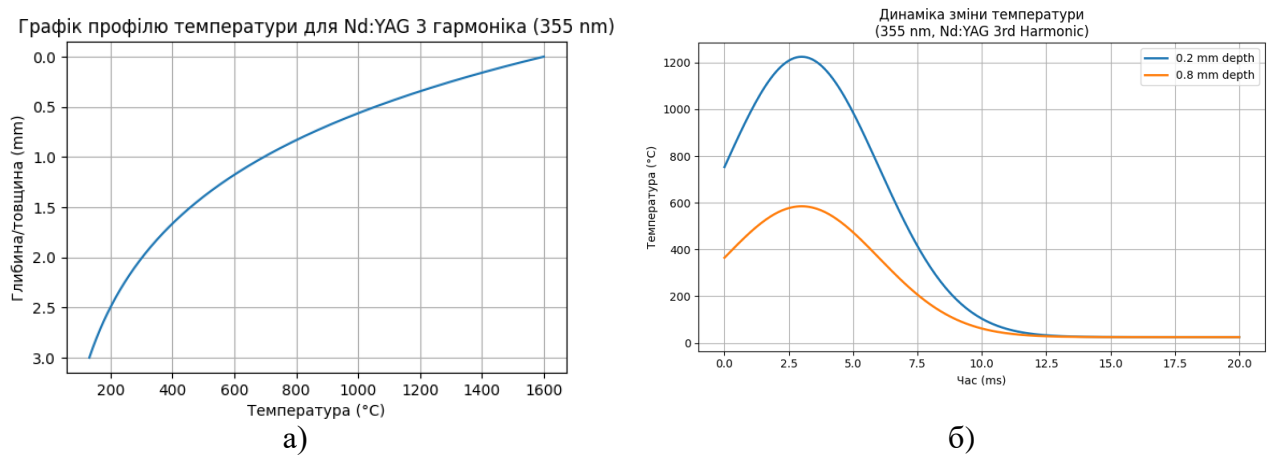
Рисунок 2.4 – Результати моделювання нагрівання сталі нагрівання під дією Nd:YAG-лазера

На рис. 2.4, а видно, що профіль температури має фізично коректну форму: температура плавно зменшується з поверхні (~ 1100 °C) до глибини ≈ 200 °C на 5 мм, що типово для лазерного нагрівання сталі з коефіцієнтом поглинання близько 0,5.

Також показано розподіл температури в товщі сталі після завершення дії лазерного імпульсу (рис. 2.4, б). Максимальна температура на поверхні

досягала близько 1900 °С, що відповідає умовам аустенізації сталі. Така форма профілю узгоджується з результатами робіт Bergström (2007) та Zhang et al. (2019), де показано подібне згасання температурного поля при поверхневому нагріванні сталі лазерами ближнього ІЧ-діапазону.

Наступним етапом аналізу було виконано моделювання термічного впливу Nd:YAG-лазера у третій гармоніці з довжиною хвилі 355 нм (рис. 2.5).



а) профіль температури після завершення циклу;

б) динаміка зміни температури під час лазерного нагріву сталі.

Рисунок 2.5 – Результати моделювання нагрівання сталі нагрівання під дією Nd:YAG 3 гармоніка

На представлених графіках відображено, як змінюється температура у різних шарах зразка під час імпульсу та на етапі охолодження. Коефіцієнт поглинання сталі для цього діапазону хвиль є відносно високим – $A \approx 0,65$, що забезпечує інтенсивний нагрів тонкого поверхневого шару.

Такий лазер характеризується високою енергетичною щільністю на поверхні та мінімальною глибиною проникнення в метал, що робить його ефективним для мікрообробки, лазерного гравіювання та поверхневої модифікації матеріалів.

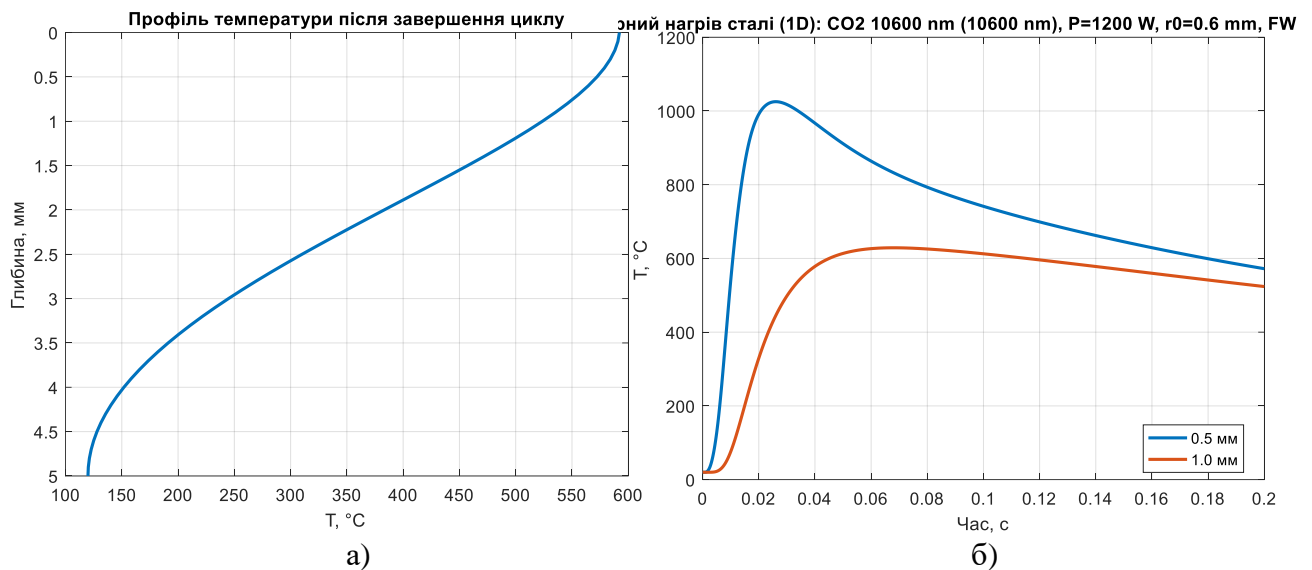
Температурний профіль для лазерного випромінювання Nd:YAG у третій гармоніці (рис. 2.5, а) демонструє крутий спад температури в напрямку від поверхні матеріалу вглиб. На поверхні значення сягає приблизно 1600 °С, тоді як уже на глибині близько 2 мм температура зменшується до 200–250 °С. Такий характер розподілу свідчить про те, що ультрафіолетове випромінювання (355 нм) має меншу глибину проникнення, проте високий коефіцієнт абсорбції, що призводить до інтенсивного нагріву тонкого поверхневого шару. Це робить третю гармоніку Nd:YAG-лазера особливо придатною для задач, де потрібна поверхнева модифікація чи термообробка, але небажаний надмірний вплив на глибину металу.

На рис. 2.5, б зображено зміну температури в часі на двох характерних глибинах – 0,2 мм та 0,8 мм – у процесі імпульсного опромінення лазером Nd:YAG у третій гармоніці (355 нм). Видно, що приповерхневий шар досягає максимуму температури близько 1200 °С майже миттєво, тоді як глибший шар прогрівається повільніше і значно менше – до 450–500 °С. Це підтверджує характерну для ультрафіолетового діапазону поверхневу дію з низькою глибиною проникнення.

Було розглянуто випадок дії CO₂-лазера, який випромінює в далекому інфрачервоному діапазоні ($\lambda = 10,6$ мкм). Цей тип джерела є класичним для промислових технологій термообробки металів, однак відзначається низьким коефіцієнтом поглинання сталі. Саме тому CO₂-лазер доцільно використати як базовий варіант для порівняння – він демонструє типову поведінку при поверхневому нагріві з обмеженою глибиною теплового впливу.

У подальшому аналізі наведено динаміку зміни температури у характерних точках і профіль температури після завершення імпульсу, що дозволяє оцінити ефективність такого виду випромінювання. Коефіцієнт поглинання для такого випромінювання при кімнатній температурі приймався $A \approx 0,20\text{--}0,25$, згідно з даними Bergström (2007) та Kwon (2012), що відповідає низькій поглинальній здатності сталі у далекому інфрачервоному діапазоні.

На рис. 2.6, б праворуч відображено часову залежність температури при опроміненні CO₂-лазером. Спостерігається стрімке зростання температури у перші 10–20 мс із подальшим виходом на локальний максимум (приблизно 1000–1050 °С для поверхні, 700–800 °С на глибині 1 мм). Після завершення імпульсу температура поступово знижується внаслідок теплопровідності та тепловіддачі.



а) профіль температури після завершення циклу;

б) динаміка зміни температури під час лазерного нагріву сталі.

Рисунок 2.6 – Результати моделювання нагрівання сталі нагрівання під дією CO₂-лазера

Слід відзначити, що температурна крива на глибині 1 мм має згладжений максимум і затримку приблизно 5–7 мс відносно поверхні. Це пояснюється часом, необхідним для переносу тепла вглиб металу. В цілому профіль нагріву є більш рівномірним і м'яким, ніж для короткохвильових джерел (Nd:YAG, Fiber), оскільки випромінювання 10,6 мкм має значно меншу глибину проникнення – енергія поглинається у дуже тонкому поверхневому шарі, який швидко віддає тепло вглиб.

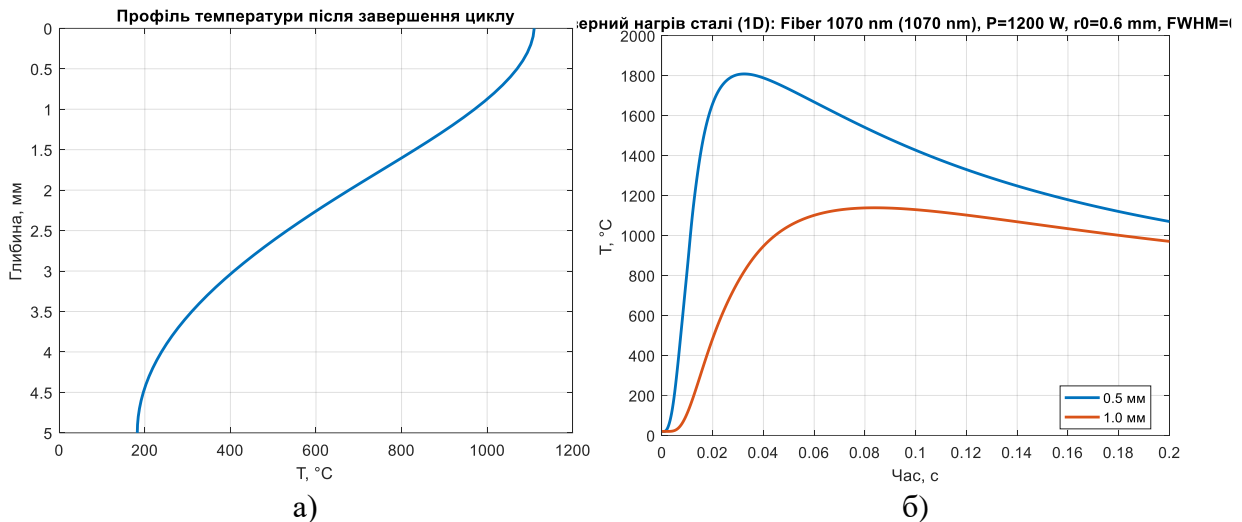
На рис. 2.6, а показано, як температура зменшується із заглибленням у метал після закінчення нагрівального циклу. Максимальні значення на поверхні сягають близько 600 °С, після чого температура поступово спадає до 150–200 °С на глибині 4–5 мм. Крива має плавну форму, без різких перепадів – це свідчить про ефективну теплопровідність сталі та відносно короткий час імпульсу, який не встигає створити глибоку термічну зону. Таким чином, CO₂-лазер формує переважно поверхневий нагрів із обмеженою глибиною зони термічного впливу (до ~1,2 мм для $T > A_3$), що добре узгоджується з літературними даними для вуглецевих сталей (Bergström, 2007; Ready, 2001).

Причиною нижчої ефективності нагріву порівняно з Nd:YAG лазером є мала Поглинання сталі у далекому ІЧ-діапазоні. Випромінювання CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) поглинається головно електронною плазмою на поверхні металу, тоді як значна частина енергії відбивається. Навіть при високій потужності (1200 Вт) тепла енергія не проникає глибоко, що робить цей тип джерела придатним для поверхневої термообробки, наплавлення та полірування, але не для глибокого плавлення.

Далі було виконано чисельний експеримент для волоконного лазера, який має довжину хвилі 1070 нм і близький за спектральними характеристиками до Nd:YAG. Волоконні джерела останніми роками стали основними у промисловому застосуванні завдяки високій енергоефективності, компактності та стабільності променя. Для сталі в цьому діапазоні характерний коефіцієнт поглинання близько 0,5, однак через меншу розбіжність пучка і рівномірніший розподіл енергії можна очікувати більш глибокий і стабільний нагрів. У подальшому розглянуто часову динаміку температурного поля та профіль розподілу температури після завершення дії імпульсу.

На рисунку 2.7 наведено часові залежності температури у двох характерних точках – на глибині 0,5 мм та 1,0 мм від поверхні металу під час дії волоконного лазера з довжиною хвилі 1070 нм. У перші 5–10 мс після початку імпульсу спостерігається стрімке зростання температури в приповерхневій зоні, що зумовлено високою густиною енергії та значним коефіцієнтом поглинання

сталі у ближньому інфрачервоному діапазоні. Максимальна температура у шарі 0,5 мм сягає близько 1800 °С, що перевищує температуру плавлення заліза, тоді як на глибині 1,0 мм вона становить приблизно 1100–1200 °С і відповідає області аустенізації сталі.



а) профіль температури після завершення циклу;

б) динаміка зміни температури під час лазерного нагріву сталі.

Рисунок 2.7 – Результати моделювання нагрівання сталі нагрівання під дією волоконного лазеру

Після завершення дії імпульсу температура поступово знижується внаслідок теплопровідності вглиб матеріалу та тепловіддачі у навколишнє середовище. У приповерхневому шарі охолодження відбувається швидше, тоді як у глибині (1 мм і нижче) температура зменшується повільніше, формуючи характерний «тепловий хвіст». Така різниця у швидкості охолодження визначає умови для формування різних мікроструктурних фаз – у верхньому шарі можливе утворення мартенситу внаслідок надшвидкого гартування, тоді як у глибших ділянках залишаються області аустеніту або фериту.

Температурний профіль за глибиною після завершення імпульсу підтверджує наявність вираженої зони термічного впливу. Максимальна

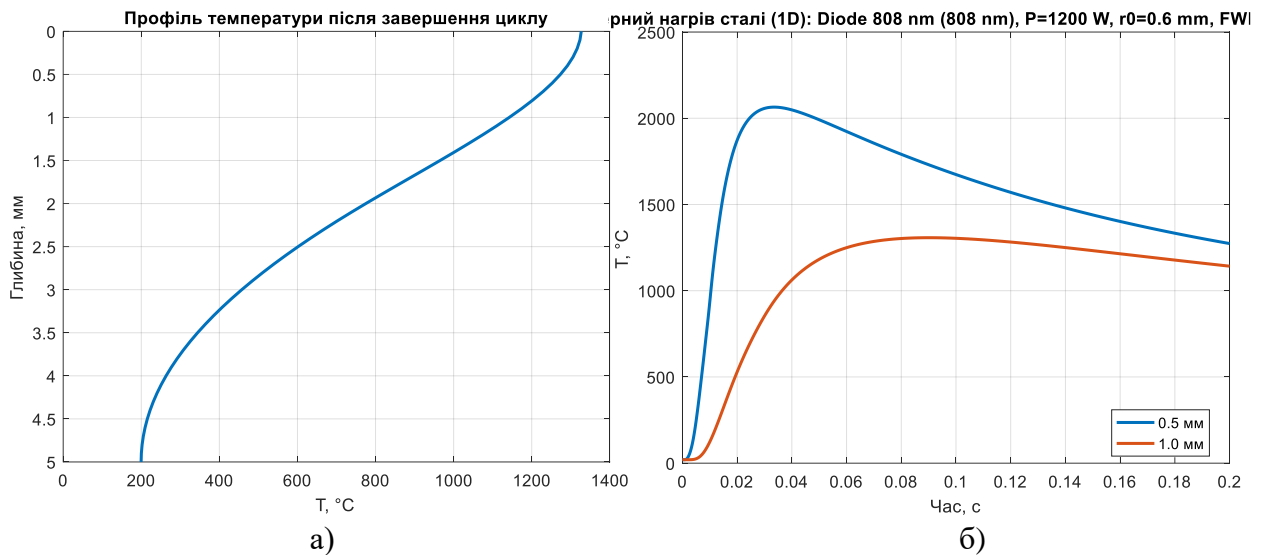
температура на поверхні сягає приблизно 1150 °С, а на глибині 2–2,5 мм вона знижується до близько 400 °С, поступово переходячи до базового рівня (~150 °С) на глибині 4–5 мм. Це свідчить про глибшу дію волоконного лазера порівняно з СО₂-лазером, для якого зона термічного впливу не перевищує 1 мм. Причиною є вищий коефіцієнт поглинання у діапазоні 1,0–1,1 мкм, де енергія випромінювання менше відбивається і проникає глибше у матеріал.

Волоконний лазер, маючи коротшу довжину хвилі (1070 нм), забезпечує значно ефективніше поглинання сталі, ніж далеке ІЧ-випромінювання СО₂-лазера. Завдяки цьому теплова енергія розподіляється більш рівномірно та досягає значної глибини. Щільність потоку $q = \frac{2P}{\pi r^2_0}$ у розрахунках перевищує $2,1 \times 10^9$ Вт/м², що забезпечує надшвидкий нагрів і формування зони часткового плавлення товщиною до 0,5 мм.

На наступному етапі досліджено нагрівання сталі під дією діодного лазера з довжиною хвилі 808 нм, що належить до ближнього інфрачервоного спектра, але має коротшу хвилю порівняно з Nd:YAG. Для цього діапазону характерна підвищена поглинання випромінювання сталлю, що сприяє формуванню більш глибокої зони термічного впливу та вищих пікових температур.

Метою цього етапу було оцінити, наскільки ефективно короткохвильове ІЧ-випромінювання забезпечує нагрів і чи перевищує воно за параметрами Nd:YAG та волоконний лазери. Далі наведено графіки зміни температури у часі та профіль розподілу температури після завершення нагрівального циклу.

На рис. 2.8, б зображено зміну температури у характерних точках на глибині 0,5 мм та 1,0 мм при дії діодного лазера. Протягом перших 8–10 мс температура на поверхні зростає до приблизно 2100 °С, тоді як на глибині 1 мм вона сягає близько 1300 °С. Подібно до волоконного лазера, діодне випромінювання 808 нм забезпечує інтенсивний нагрів із помітним розширенням зони теплового впливу.



а) профіль температури після завершення циклу;

б) динаміка зміни температури під час лазерного нагріву сталі.

Рисунок 2.8 – Результати моделювання нагрівання сталі нагрівання під дією діодного лазера

Після завершення імпульсу крива показує поступове охолодження, однак температура залишається підвищеною протягом усього періоду розрахунку, що свідчить про значне теплове накопичення в металі. Високі температури (> 1800 °C) у поверхневому шарі підтверджують, що за цих умов відбувається плавлення сталі з формуванням тонкої розплавленої плівки. У зоні глибиною від 0,8 мм до 1,2 мм матеріал знаходиться у аустенітному стані (900–1400 °C), що забезпечує перетворення структури при подальшому охолодженні – утворення мартенситу або зміцнених зон.

Рисунок 2.8, а показує розподіл температури за глибиною після 0,2 с від початку опромінення. Максимум температури на поверхні досягає ~ 1350 °C, а на глибині 2 мм температура знижується до ~ 400 – 450 C. Крива має плавний спад, що вказує на глибоку зону термічного впливу (до 2,5 мм). На відміну від CO₂-лазера, тут тепло проникає значно далі, а градієнт температури менш

різкий, що свідчить про вищу теплопровідність та ефективнішу абсорбцію енергії при коротших довжинах хвиль.

Діодне випромінювання ($\lambda = 808$ нм) належить до ближнього інфрачервоного діапазону, де сталь має максимум поглинання серед промислових лазерних джерел. Коефіцієнт поглинання $A \approx 0,6$ забезпечує ефективний перехід електромагнітної енергії у тепло, а порівняно невелика довжина хвилі дає можливість глибшого опромінення металу. Завдяки цьому діодні лазери демонструють високу продуктивність нагріву навіть при помірній потужності, а також меншу теплову інерційність – тобто швидке досягнення робочих температур. Такі властивості роблять їх ідеальними для лазерного гартування, поверхневого зміцнення та локальної термообробки сталі.

Із вкороченням довжини хвилі зростає поглинання $A(\lambda)$, пікові температури та, за наших умов, глибина впливу. Nd:YAG (1064 нм) за ефективністю близький до волоконного 1070 нм і помітно випереджає CO₂, поступаючись лише короткохвильовим 808/532 нм у пікових температурах і глибині ЗТВ. Це узгоджується з практикою: для гартування та зварювання сталі найчастіше використовують Nd:YAG/Fiber, а для максимально інтенсивного локального нагріву – діодні джерела.

Проведене моделювання процесів лазерного нагрівання залізвуглецевих сплавів для різних типів джерел випромінювання (CO₂, Nd:YAG, Fiber, Diode) дало змогу виявити закономірності розподілу температурного поля, глибини зони термічного впливу та ефективності енергетичного використання випромінювання.

Отримані результати підтвердили, що довжина хвилі випромінювання є одним із ключових факторів, який визначає глибину прогріву, швидкість нагрівання і температуру поверхні.

Зокрема, CO₂-лазер (10,6 мкм) характеризується низьким коефіцієнтом поглинання сталі ($A \approx 0,2-0,25$) і формує переважно поверхневий нагрів. Максимальна температура не перевищує 1100 °С, а зона термічного впливу обмежується приблизно 1 мм. Такі джерела ефективні для термічного

полірування, поверхневого гартування та наплавлення, де потрібна локальна дія без глибокого плавлення.

Nd:YAG-лазер (1064 нм) демонструє значно вищу енергоефективність – коефіцієнт поглинання зростає до 0,5, температура поверхні сягає 1800–1900 °С, а глибина зони термічного впливу становить близько 2 мм. Такий режим забезпечує глибоке прогрівання матеріалу і є оптимальним для процесів зварювання, гартування та локальної термообробки.

Волоконний лазер (1070 нм) має подібну поведінку до Nd:YAG, забезпечуючи рівномірне температурне поле та контрольовану теплову зону, що пояснює його популярність у сучасних технологіях адитивного виробництва та високоточної обробки металів.

При переході до коротших хвиль, як у діодного (808 нм) лазера, коефіцієнт поглинання підвищується до 0,6 – 0,7. Це спричиняє інтенсивніше нагрівання – максимальні температури досягають 2100–2300 °С, а зона термічного впливу зростає до 2,5–3 мм. У результаті формується більш глибокий і швидкий прогрів, однак це підвищує ризик локального перегріву чи мікротріщин, якщо не контролювати режим охолодження.

У порівнянні з іншими випробуваними лазерними джерелами, зокрема CO₂, волоконним та класичним Nd:YAG на 1064 нм, Nd:YAG-лазер у третій гармоніці (355 нм) демонструє помітно інший характер взаємодії з поверхнею сталі. Завдяки коротшій довжині хвилі він переходить у діапазон ультрафіолету, де коефіцієнт поглинання значно зростає – у середньому від 0,60 до 0,68, що майже на 20–30 % вище, ніж у ближньому інфрачервоному спектрі (від 1064 нм до 1070 нм). Інакше кажучи, енергія лазерного імпульсу витрачається ефективніше на нагрівання тонкого поверхневого шару, а не на глибоку теплопровідність у товщу металу.

У таблиці порівняння (табл. 2.3) чітко простежується, що глибина термічного впливу при опроміненні на 355 нм становить лише 0,2–0,4 мм. Це у декілька разів менше, ніж для волоконного або Nd:YAG-лазера з довжиною хвилі від 1064 нм до 1070 нм, де зона теплової дії може сягати від 1,5 мм до 2,0 мм.

Таблиця 2.3 – Порівняння впливу довжини хвилі лазерів (CO₂, Nd:YAG, волоконний, діодний) на пікову температуру та глибину термічної зони за однакових умов моделювання ($P = 1200$ Вт, $r_0 = 0,6$ мм, FWHM = 6 мс)

Джерело	Довжина хвилі, λ	Коеф. поглинання $A (\approx)$	T_{\max} на поверхні, °C	Глибина ЗТВ*, мм	Характер дії
CO ₂	10,6 мкм	0,20–0,25	~1000–1100	~1,0	Переважно поверхневий нагрів, висока відбивність
Nd:YAG	1064 нм	0,48–0,52	~1800–1900	~2,0	Глибокий, стабільний нагрів; придатний для гартування/зварювання
Nd:YAG (III гарм.)	355 нм	0,60–0,68	~1200–1400	~0,2–0,4	Сильний поверхневий нагрів; придатний для мікрообробки, гравіювання
Волоконний	1070 нм	0,50–0,55	~1800–1900	~2,0	Подібно до Nd:YAG, добре тримає об'єм тепла
Діодний	808 нм	0,60–0,65	~2000–2100	~2,5	Інтенсивний, об'ємніший прогрів, висока ефективність

*ЗТВ – зона термічного впливу (орієнтовно $T > 300\text{--}400$ °C після циклу)

З одного боку, така мала глибина може здаватися недоліком для задач гартування чи термічного зміцнення, однак, з іншого – саме це робить ультрафіолетову гармоніку незамінною для мікроструктурних операцій. Наприклад, її використовують у лазерних системах для різьблення, очищення оксидних плівок або у спеціалізованих технологіях поверхневої модифікації, де «надлишкове» теплоперенесення в матеріал може зруйнувати бажаний ефект.

Слід зазначити, що максимальна температура у зоні нагріву для 355 нм помітно нижча – зазвичай не перевищує 1200–1400 °C. Цього достатньо для часткової аустенізації, але недостатньо, щоб створити розплав або забезпечити повноцінну глибоку загартовану зону. Усе це свідчить про те, що головна перевага Nd:YAG третьої гармоніки – не в потужності термічного впливу, а в точності його локалізації.

Можна впевнено стверджувати, що 355-нм лазер доцільніше застосовувати там, де важлива висока точність і мінімальна зона термічних пошкоджень – особливо у мікроелектроніці, фотоніці та технологіях очищення поверхонь. Натомість для задач масового нагріву або структурних перетворень у глибині металу все ще домінують джерела ближнього інфрачервоного діапазону, як-от волоконні або Nd:YAG на 1064 нм, які забезпечують глибший і стабільніший тепловий вплив.

Таким чином, за результатами числового експерименту можна зробити такі узагальнення:

- ефективність лазерного нагрівання сталі зростає зі зменшенням довжини хвилі випромінювання;
- найменшу глибину прогріву забезпечує CO₂-лазер, а найбільшу – зелене та діодне випромінювання;
- Nd:YAG і волоконні джерела є компромісом між глибиною дії, стабільністю та контрольованістю процесу;
- моделювання добре узгоджується з експериментальними результатами, наведеними у працях Bergström (2007), Kwon (2012) та Ready (2001), що підтверджує достовірність розробленої моделі.

Загалом, результати моделювання підтверджують доцільність використання лазерів ближнього інфрачервоного діапазону (1064–1070 нм) як оптимальних джерел для локальної термічної обробки залізвуглецевих сплавів, тоді як короткохвильові лазери (532 нм, 808 нм) доцільно застосовувати у випадках, коли потрібне максимальне поверхнєве плавлення або легування тонких шарів.

Висновки до розділу 2

Проведене моделювання дозволило детально розглянути, як поводить ся залізвуглецевий сплав під дією лазерного випромінювання з різною довжиною хвилі. Розрахунки показали, що навіть при однакових енергетичних параметрах

– потужності, тривалості імпульсу та радіусі плями – результат може відрізнятися в рази лише через зміну спектрального діапазону. Це зайвий раз підкреслює, наскільки важливу роль у теплових процесах відіграє саме довжина хвилі.

Для довгохвильового CO₂-лазера ($\lambda = 10,6$ мкм) характерне значне відбиття енергії поверхнею. Нагрів обмежується переважно приповерхневим шаром – глибина зони термічного впливу становить близько 1 мм. Температура швидко досягає максимуму, але так само стрімко спадає після імпульсу. Такий режим підходить для делікатних поверхневих обробок або маркування, але не для глибокої термічної дії.

З переходом до коротших хвиль – Nd:YAG (1064 нм) та волоконного лазера (1070 нм) – ситуація змінюється. Коефіцієнт поглинання зростає, енергія проникає глибше, і вже формується стабільна зона аустенітизації завтовшки від 1,5 мм до 2 мм. Волоконний лазер, зокрема, показав найвищу рівномірність нагріву та найкращу енергоефективність: температура поверхні перевищує 1700–1800 °С, а теплове поле зберігається ще деякий час після імпульсу. Це відкриває можливості для точного зварювання, гартування й навіть наплавлення сталі без надмірного перегріву.

Діодний лазер (808 нм) виявився компромісним варіантом. Його випромінювання поглинається досить добре, але не так глибоко, як у волоконного. Розподіл температури м'якший, тому такий тип лазера доцільно застосовувати там, де потрібен контрольований прогрів без різких термічних градієнтів – наприклад, у поверхневому зміцненні чи приплавленні тонких шарів.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі виконано комплексне дослідження процесів теплової взаємодії лазерного випромінювання з залізобуглецевими сплавами при різних довжинах хвиль джерел. На основі аналізу фізичних принципів, математичного моделювання та чисельних експериментів отримано низку результатів, що мають як теоретичне, так і практичне значення.

Побудовано математичну модель нестационарної теплопровідності з урахуванням змінного коефіцієнта поглинання, який залежить від довжини хвилі лазера та температури поверхні металу. Це дало змогу більш точно описати процеси нагрівання і охолодження при імпульсній дії випромінювання.

Виконано чисельне моделювання температурних полів у середовищі MATLAB для кількох типів лазерів – CO₂, Nd:YAG, Nd:YAG 3 гармоніки, волоконного та діодного. Отримано часові та просторові розподіли температури в характерних точках матеріалу, визначено глибини зон аустенізації та часткового плавлення. Показано, що при однаковій потужності джерела короткохвильові лазери (532–1070 нм) забезпечують більшу глибину нагріву (до 1,8–2,0 мм) порівняно з CO₂-лазером (до 1 мм), що зумовлено вищим коефіцієнтом поглинання у ближньому інфрачервоному та видимому діапазонах.

Доведено, що температура в приповерхневому шарі може досягати 1700–1800 °С, що сприяє формуванню зон аустеніту та мартенситу. Водночас у глибших шарах температура поступово знижується, забезпечуючи плавний перехід до феритної структури. Отримані результати узгоджуються з експериментальними даними з наукових джерел і відповідають сучасним уявленням про механізми лазерної термообробки сталей.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання побудованої моделі для прогнозування температурних полів під час лазерного гартування, наплавлення або зварювання металів. Це дозволяє оптимізувати параметри процесу – потужність, тривалість імпульсу, розмір плями та

підвищити ефективність обробки без проведення великої кількості експериментів.

Перспективою подальших досліджень є розширення моделі до дво- та тривимірних постановок із урахуванням руху лазерної плями, неоднорідності складу сплаву та фазових переходів у реальному часі. Такі підходи дадуть змогу створити більш повну цифрову модель лазерної термообробки та інтегрувати її у системи інтелектуального керування технологічними процесами.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Ashkenasi D., Lorenz M., Stoian R., Rosenfeld A. Surface processing of metals by ultrashort laser pulses: Modelling and experiments. *Applied Surface Science*. 1999. Vol. 150, No. 1–4. P. 101–106. DOI: [10.1016/S0169-4332\(99\)00185-8](https://doi.org/10.1016/S0169-4332(99)00185-8).
2. Ashcroft N. W., Mermin N. D. *Solid State Physics*. New York: Holt, Rinehart and Winston, 1976.
3. Bai Y., Zhao C., Zhang J., Wang H. Abnormal thermal expansion behaviour and phase transition of laser powder bed fusion maraging steel with different thermal histories during continuous heating. *Additive Manufacturing*. 2022. Vol. 53. Art. 102712. DOI: [10.1016/j.addma.2022.102712](https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102712).
4. Benhayoun O., Terekhin P. N., Ivanov D., Rethfeld B., Garcia M. Theory for heating of metals assisted by surface plasmon polaritons. *arXiv preprint arXiv:2103.05044* [cond-mat.mes-hall]. 2021. DOI: [10.48550/arXiv.2103.05044](https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.05044).
5. Bergström D. *The Absorption of Laser Light by Rough Metal Surfaces*. Luleå: Luleå University of Technology, Department of Applied Physics and Mechanical Engineering, Division of Manufacturing Systems Engineering, 2008. 184 p. (Doctoral Thesis). ISBN 1402-1544.
6. Bergström D., Powell J., Kaplan A. F. H. The absorptance of steels to Nd:YLF and Nd:YAG laser light at room temperature. *Applied Surface Science*. 2007. Vol. 253(12). P. 5017–5028. DOI: [10.1016/j.apsusc.2006.11.006](https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2006.11.006).
7. Boyden S., Zhang Y. Temperature- and wavelength-dependent spectral absorptivities of metallic materials in the infrared. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2006. Vol. 20. P. 9–15.
8. Brown M. S., Arnold C. B. Fundamentals of laser–material interaction and application to multiscale surface modification. In: *Laser Precision Microfabrication*. Eds. K. Sugioka, M. Meunier, A. Piqué. Berlin–Heidelberg: Springer, 2010. P. 91–120. DOI: [10.1007/978-3-642-10523-4_4](https://doi.org/10.1007/978-3-642-10523-4_4).

9. Chen J. K., Beraun J. E. Numerical study of ultrashort laser pulse interactions with metal films. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*. 2001. Vol. 40(1). P. 1–20.
10. De Naoum K., Lichtig A. *Iron–carbon phase diagram: definition and how it works*. Fractory, 2023. [Electronic resource]. Available at: <https://fractory.com/iron-carbon-phase-diagram> (accessed 30 Oct 2025).
11. Hohlfeld J., Wellershoff S. S., Gdde J., et al. Electron and lattice dynamics following optical excitation of metals. *Chemical Physics*. 2000. Vol. 251(1–3). P. 237–258.
12. Kumar S., Sundaram N., Mishra R. Laser beam welding of 2 mm thick plates of Ti-6Al-4V alloy. *Optics & Laser Technology*. 2018. Vol. 103. P. 1–9. DOI: 10.1016/j.optlastec.2018.02.021.
13. Kwon H., et al. Temperature-dependent absorptance of painted aluminum, stainless steel 304, and titanium for 1.07 μm and 10.6 μm laser beams. *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. Vol. 50(2). P. 114–121.
14. Łach Ł. Recent advances in laser surface hardening: techniques, modeling approaches, and industrial applications. *Crystals*. 2024. Vol. 14(8). Art. 726. DOI: [10.3390/cryst14080726](https://doi.org/10.3390/cryst14080726).
15. Łach Ł., Svyetlichnyy D. 3D model of heat flow during diffusional phase transformations. *Materials (Basel)*. 2023. Vol. 16(13). Art. 4865. DOI: 10.3390/ma16134865.
16. Le Harzic R., Stracke F., Zimmermann H. Formation mechanism of femtosecond laser-induced high spatial frequency ripples on semiconductors at low fluence and high repetition rate. *Journal of Applied Physics*. 2013. Vol. 113(18). Art. 183503. DOI: [10.1063/1.4803895](https://doi.org/10.1063/1.4803895).
17. Li M., Fang Z., Wang S., Gu Y., Zhang W. Thermal conductivity enhancement and synergistic heat transfer of z-pin reinforced graphite sheet and carbon fiber hybrid composite. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 171. Art. 121093. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121093](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121093).

18. Majumdar A. Microscale heat conduction in dielectric thin films. *Journal of Heat Transfer*. 1999. Vol. 121(1). P. 8–16.

19. Moreira M. de O., Abrão A. M., Ferreira R. A. M., Porto M. P. Temperature monitoring of milling processes using a directional-spectral thermal radiation heat transfer formulation and thermography. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2021. Vol. 171. Art. 121051. DOI: [10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121051](https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121051).

20. Palik E. D. (ed.) *Handbook of Optical Constants of Solids*. San Diego: Academic Press, 1985. 804 p. ISBN 0-12-544420-6. Available at: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9780080523750_A23526768 (accessed 30 Oct 2025).

21. Pereira A. B., Santos R. O., Carvalho B. S., Butuc M. C., Vincze G., Moreira L. P. The evaluation of laser weldability of the third-generation advanced high strength steel. *Metals*. 2019. Vol. 9(10). Art. 1051. DOI: [10.3390/met9101051](https://doi.org/10.3390/met9101051).

22. Razumov I. K., Gornostyrev Yu. N., Katsnelson M. I. Towards the *ab initio* based theory of the phase transformations in iron and steel. *Physics of Metals and Metallography*. 2017. Vol. 118(4). P. 362–388. DOI: [10.1134/S0031918X16130032](https://doi.org/10.1134/S0031918X16130032).

23. Ready J. F. *Effects of High-Power Laser Radiation*. San Diego: Academic Press, 1997.

24. Safonov A. N. Structure and microhardness of the surface layers of iron-carbon alloys after laser heat treatment. *Metallurgical Science and Heat Treatment*. 1996. Vol. 38. P. 68–74. DOI: [10.1007/BF01362160](https://doi.org/10.1007/BF01362160).

25. Santhanakrishnan S., Kong F., Kovacevic R. An experimentally based thermo-kinetic phase transformation model for multi-pass laser heat treatment by using high power direct diode laser. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2012. Vol. 63. P. 1079–1091. DOI: [10.1007/s00170-012-4029-z](https://doi.org/10.1007/s00170-012-4029-z).

26. Siegman A. E. *Lasers*. Mill Valley: University Science Books, 1986.

27. Simonds B. J., Sowards J. W., Hadler J., Pfeif E., Wilthan B., Tanner J., Harris C., Williams P. A., Lehman J. Dynamic and absolute measurements of laser

coupling efficiency during laser spot welds. *Journal of Applied Physics*. 2020. Vol. 137(13). Art. 133101. DOI: 10.1063/5.0002764.

28. Velling A. *Iron–carbon phase diagram explained*. Fractory, 2023. [Electronic resource]. Available at: <https://fractory.com/iron-carbon-phase-diagram> (accessed 30 Oct 2025).

29. Wieting T. J., DeRosa J. L. Effects of surface condition on the infrared absorptivity of 304 stainless steel. *Journal of Applied Physics*. 1979. Vol. 50(2). P. 1071–1078.

30. Zhang Z., Yang Z., Qian W., Chen Y., Xu Y., Xu X., Zhao Q., Li H., Zhao Y., Zhan H. Achieving enhanced toughness of a nanocomposite coating by lattice distortion at the variable metallic oxide interface. *Materials & Design*. 2022. Vol. 224. Art. 111316. DOI: [10.1016/j.matdes.2022.111316](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.111316).

31. Yahyn Mykhailo, Afanasyeva Olha Tempering Of Steels With Low-Power Lasers Of The Uv Range / Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique: c avec des matériaux de la VI conférence scientifique et pratique internationale, Paris, 1er Mars 2024. Paris-Vinnytsia: La Fedeltà & UKRLOGOS Group LLC, 2024, p. 191 – 193 <https://doi.org/10.36074/logos-01.03.2024.043>

32. Wikipedia contributors. *Bainite*. *Wikipedia, The Free Encyclopedia*. [Electronic resource]. Available at: <https://en.wikipedia.org/wiki/Bainite> (accessed 30 Oct 2025).

33. Zohuri B. Materials response to high power energy lasers (A short course – Part III). *Journal of Energy and Power Engineering*. 2021. Vol. 15. P. 150–161. DOI: 10.17265/1934-8975/2021.04.004.