

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 перший (бакалаврський)  
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО ГАРТУВАННЯ  
ВУГЛЕЦЕВИХ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ  
(тема)

Виконав:  
здобувач 4 року навчання,  
групи МТІОЛС-21-1  
Максим КОСЯЧЕНКО  
(власне ім'я, прізвище)

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

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма «Інженерія  
оптоінформаційних та лазерних систем»  
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. каф. ФОЕТ Ольга АФАНАСЬЄВА  
(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач 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 \_\_\_\_\_ перший (бакалаврський) \_\_\_\_\_

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

Тип програми \_\_\_\_\_ освітньо-професійна \_\_\_\_\_

Освітня програма \_\_\_\_\_ «Інженерія оптоінформаційних та лазерних систем» \_\_\_\_\_  
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_ Косяченку Максиму Андрійовичу \_\_\_\_\_  
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_ Моделювання процесів лазерного гартування вуглецевих інструментальних сталей \_\_\_\_\_

затверджена наказом університету від « 23 » \_\_\_\_\_ травня \_\_\_\_\_ 2025 р. № 408 Ст \_\_\_\_\_

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії \_\_\_\_\_ 23 червня \_\_\_\_\_ 2025 р. \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_ загальна характеристика лазерного гартування; властивості вуглецевих інструментальних сталей; основи лазерного гартування; методи моделювання процесів гартування; програмні засоби моделювання. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

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

1 Надати аналітичний огляд літератури. \_\_\_\_\_

2 Дослідити фактори які впливають на процеси лазерного гартування \_\_\_\_\_

3 Провести власний розрахунок. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій  
Демонстраційний матеріал – 12 слайдів.

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерне гартування	02.03.25–22.03.25	Виконано
2	Дослідження варіантів та конструкцій лазерів для обробки металів	23.04.25–02.05.25	Виконано
3	Огляд програмних засобів для моделювання	03.05.25–13.05.25	Виконано
4	Математичне моделювання лазерного гартування	14.05.25–20.05.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	21.05.25–03.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	04.06.25–08.06.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	09.06.25–18.06.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	19.06.22–21.06.22	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.06.22–24.06.22	Виконано

Дата видачі завдання 02 березня 2025 р.

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_ доц. каф. ФОЕТ Ольга АФАНАСЬЄВА  
(підпис) (посада, власне ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 34 с., 9 рис., 1 табл., 10 джерел, 1 додаток.

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД, ВОЛОКОННИЙ ЛАЗЕР, ВУГЛЕЦЕВА СТАЛЬ, ЛАЗЕРНЕ ГАРТУВАННЯ, , МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, CO<sub>2</sub>-ЛАЗЕР, Nd:YAG-ЛАЗЕР.

Об'єкт дослідження – моделювання процесів лазерного гартування вуглецевих інструментальних сталей.

Метою кваліфікаційної роботи є аналіз сучасного стану наукових досліджень та практичних розробок у галузі моделювання процесів лазерного гартування вуглецевих інструментальних сталей, виявлення існуючих підходів, моделей, методів розрахунку, а також перспектив подальшого розвитку цієї технології.

Метод дослідження – теоретичний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено наступні завдання.

1. Дослідити фізичні основи лазерного гартування вуглецевих сталей.
2. Дослідити конструкції систем лазерів для гартування сталей.
3. Провести аналітичний аналіз літератури.
4. Провести аналітичний експеримент.

## **ABSTRACT**

Explanatory note of the qualification work: 34 pp., 9 figures, 1 tables, 10 sources, 1 appendix.

**ANALYTICAL REVIEW, CARBON STEEL, CO<sub>2</sub>-LASER, FIBER LASER, LASER HARDENING, MATHEMATICAL MODELING, Nd:YAG-LASER,**

The object of research is modeling of laser hardening processes of carbon tool steels.

The research method is theoretical.

The purpose of the qualification work is to analyze the current state of scientific research and practical developments in the field of modeling the processes of laser hardening of carbon tool steels, to identify existing approaches, models, calculation methods, as well as prospects for further development of this technology.

To achieve this goal, the following tasks were set and solved.

1. To investigate the physical basis of laser hardening of carbon steels.
2. To study the design of laser systems for steel hardening.
3. To conduct an analytical analysis of the literature.
4. To conduct an analytical experiment.

## ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Фізично-хімічні основи процесів лазерного гартування .....	8
1.1 Загальна характеристика лазерного гартування .....	8
1.2 Властивості вуглецевих інструментальних сталей .....	11
1.3 Основні фізико-механічні властивості .....	11
1.4 Фізико-хімічні основи процесу лазерного гартування .....	12
1.5 Механізм теплової дії лазерного променя.....	12
1.6 Фазові перетворення .....	12
1.7 Кінетика нагрівання та охолодження .....	13
1.8 Хімічні процеси .....	13
2 Методи моделювання процесів гартування .....	14
2.1 Аналітичні моделі .....	14
2.2 Облік залишкових напружень.....	16
2.3 Огляд сучасних підходів і програмного забезпечення для моделювання лазерної обробки .....	16
2.4 Узагальнення можливостей .....	22
2.5 Дослідження температурних полів при лазерному нагріванні .....	22
2.6 Прогнозування фазових перетворень у вуглецевих сталях .....	23
2.7 Оптимізація траєкторії лазерного променя у Simufac.....	23
2.8 Власний експеримент .....	24
2.9 Підсумки .....	26
3 Аналіз сучасних труднощів і перспектив подальших досліджень у моделюванні лазерного гартування .....	28
3.1 Нелінійність фізичних властивостей матеріалів.....	28
3.2 Моделювання фазових перетворень .....	28
3.3 Врахування залишкових напружень .....	29
3.4 Труднощі валідації моделей.....	29
3.5 Обмеження обчислювальних ресурсів.....	29
3.6 Перспективи подальших досліджень .....	30
Висновки .....	31
Перелік джерел посилання .....	34
Додаток А Демонстраційний матеріал .....	35

## ВСТУП

У сучасному машинобудуванні та металообробці одним з ключових завдань є забезпечення високої зносостійкості та тривалої експлуатації деталей, які працюють в умовах високих навантажень, тертя та агресивного середовища. Особливу увагу в цьому контексті привертають вуглецеві інструментальні сталі, які завдяки своїм властивостям широко застосовуються для виготовлення ріжучого, вимірювального та штампувального інструменту.

Одним з найбільш перспективних методів підвищення експлуатаційних характеристик сталевих деталей є лазерне гартування – технологія локального термічного оброблення матеріалу, яка ґрунтується на використанні висококонцентрованого лазерного випромінювання. Порівняно з традиційними методами гартування, лазерне гартування забезпечує меншу зону термічного впливу, високу точність, мінімальні деформації та можливість автоматизації процесу [1, 2].

Разом з поширенням лазерних технологій зростає і необхідність у моделюванні процесів лазерного гартування, що дозволяє дослідити температурні поля, глибину та форму зон гартування, зміну мікроструктури, а також прогнозувати властивості поверхневого шару. Комп'ютерне моделювання відіграє важливу роль у зниженні витрат на проведення експериментів, оптимізації параметрів технології та підвищенні якості обробки.

Актуальність теми зумовлена також інтенсифікацією наукових досліджень у галузі теплофізичного, математичного та програмного моделювання процесів лазерної обробки матеріалів, зокрема вуглецевих сталей, які мають складну поведінку при швидкому нагріванні та охолодженні.

Метою даної роботи є аналіз сучасного стану наукових досліджень та практичних розробок у галузі моделювання процесів лазерного гартування вуглецевих інструментальних сталей, виявлення існуючих підходів, моделей, методів розрахунку, а також перспектив подальшого розвитку цієї технології.

# 1 ФІЗИЧНО-ХІМІЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСІВ ЛАЗЕРНОГО ГАРТУВАННЯ

## 1.1 Загальна характеристика лазерного гартування

Лазерне гартування – це високотехнологічний процес термічної обробки, який використовує енергію лазерного випромінювання для локального нагрівання поверхневого шару металу до температури, що перевищує критичну точку фазового переходу. Після нагріву матеріал швидко охолоджується, переважно за рахунок тепловідводу вглиб незагатованої частини деталі, що призводить до утворення загатованої структури – мартенситу.

Основною перевагою лазерного гартування є можливість високоточної обробки локальних ділянок деталі без суттєвого впливу на навколишній матеріал. Це особливо важливо при зміцненні робочих поверхонь складних конструкцій, таких як зубчасті колеса, вали, штампи, інструменти тощо [2, 3].

Серед ключових характеристик процесу лазерного гартування варто відзначити:

- високу щільність енергії лазерного променя ( $10^6$ – $10^9$  Вт/м<sup>2</sup>), що забезпечує швидкий локальний нагрів;
- мінімальний тепловий вплив на основний матеріал (мала зона термічного впливу);
- можливість автоматизації та інтеграції в роботизовані комплекси;
- безконтактність процесу, що зменшує механічне навантаження на деталь;
- зниження потреби в додатковій механічній обробці після гартування.

Види лазерів, що застосовуються:

- а) CO<sub>2</sub>-лазери (довжина хвилі  $\sim 10,6$  мкм) (рис. 1.1) – характеризуються високою потужністю і великою глибиною проникнення;

б) d:YAG-лазери (1064 нм) (рис. 1.2) – зручні для точкової обробки і мають хорошу фокусованість.

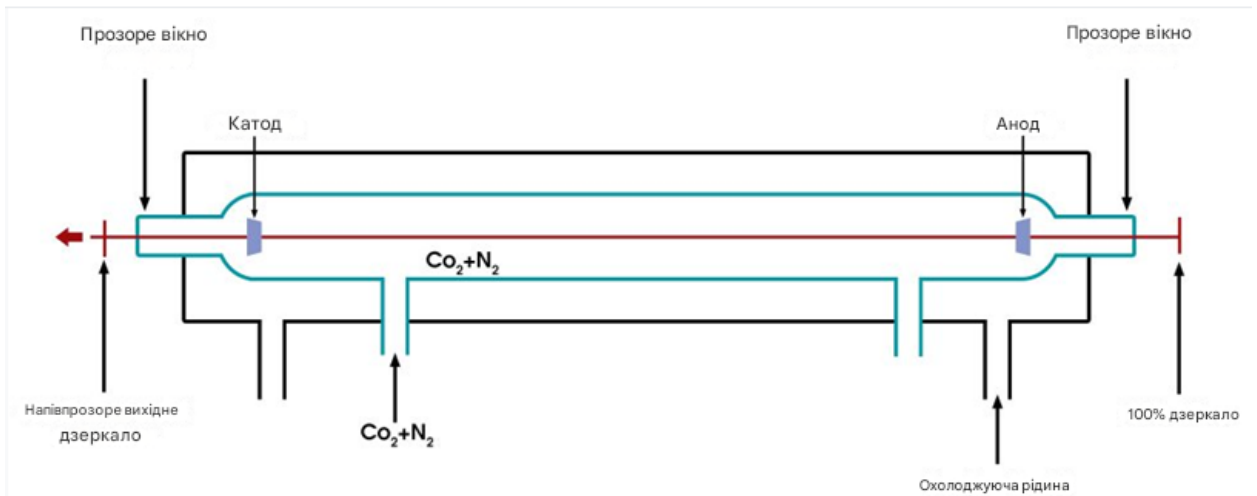


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення CO<sub>2</sub>-лазера

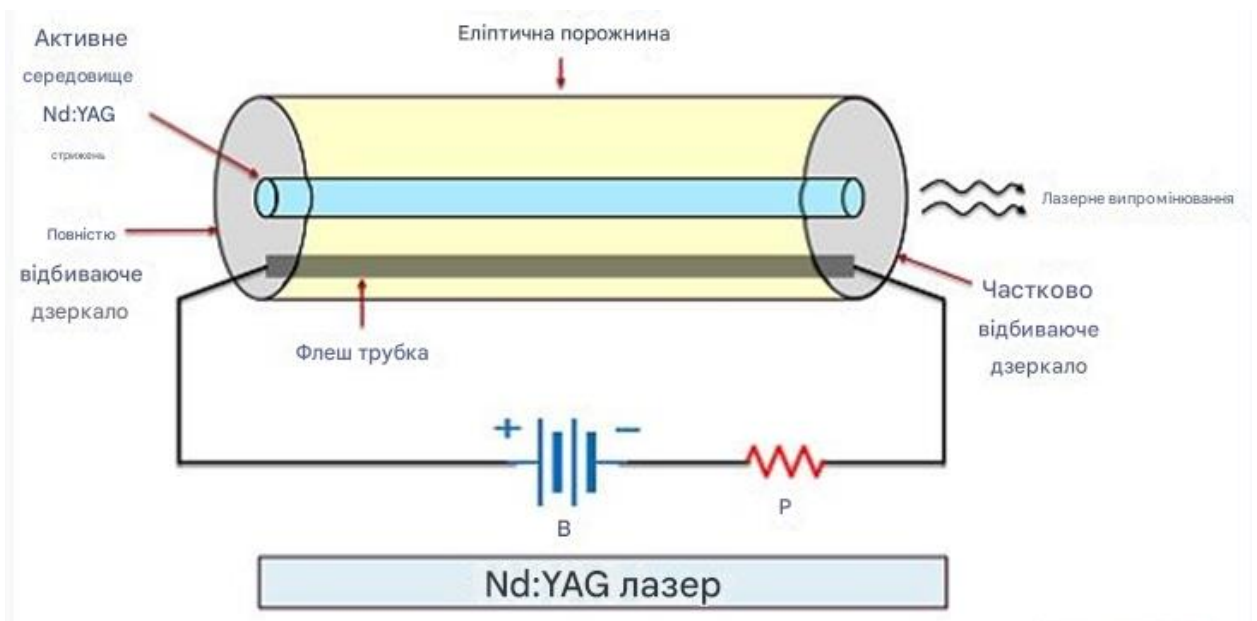


Рисунок 1.2 – Схематичне зображення Nd:YAG-лазера

Волоконні лазери (рис. 1.3) – компактні, енергоефективні, з відмінною стабільністю променя, що робить їх все більш популярними в промисловості.



Рисунок 1.3 – Схематичне зображення волоконного лазера

До технологічних параметрів, які впливають на ефективність лазерного гартування, належать:

- потужність та діаметр променя;
- швидкість переміщення лазерного джерела;
- час опромінення;
- теплопровідність та теплоємність матеріалу;
- температура фазового переходу;
- ступінь відбиття та поглинання енергії матеріалом.

Регулювання цих параметрів дозволяє досягти оптимальної глибини загартування, мінімізувати залишкові напруження та уникнути утворення тріщин.

## 1.2 Властивості вуглецевих інструментальних сталей

Вуглецеві інструментальні сталі – це спеціальна група сталей, що містять високий вміст вуглецю (понад 0,6 %) і призначені для виготовлення інструментів, які працюють в умовах значних навантажень, зносу та тертя. Такі сталі відзначаються високою твердістю, зносостійкістю, але мають обмежену термостійкість і крихкість при високих температурах [2, 4].

Вуглецеві інструментальні сталі класифікують за ГОСТ або ISO за наступними ознаками:

- сталі для холодної обробки (наприклад, У8, У10, У12) – використовуються для виготовлення штампів, ножів, матриць;
- сталі для гарячої обробки (наприклад, Х12М, 5ХНМ) – застосовуються для прес-форм, штампів гарячого видавлювання;
- сталі загального призначення – ріжучий інструмент, пилки, свердла, шеврони тощо.

### 1.3 Основні фізико-механічні властивості

Ключові властивості вуглецевих інструментальних сталей, що впливають на процес лазерного гартування:

- високий вміст вуглецю (від 0,6 % до 1,3 %) забезпечує здатність до гартування та високу твердість після термообробки;
- малий вміст легувальних елементів, що знижує вартість, але зменшує термостійкість;
- низька теплова провідність, що сприяє формуванню високих температур в зоні лазерного впливу;
- крихкість при перевищенні температур критичних точок, що вимагає точного контролю над параметрами нагріву;
- піддатливість до утворення мартенситної структури при швидкому охолодженні, що є метою процесу гартування.

Поведінка при лазерному впливі. При лазерному нагріванні вуглецеві сталі демонструють інтенсивне поглинання енергії, що сприяє ефективному локальному нагріву. Через низьку теплопровідність тепло концентрується у вузькому шарі, забезпечуючи високу градієнтність температур. Це дозволяє досягати високої твердості (до 60–65 HRC) в загартованій зоні при мінімальному об'ємі обробки.

Однак надмірне локальне нагрівання або неправильний вибір режиму може призвести до перегріву, плавлення або тріщиноутворення, що робить необхідним використання математичних моделей для прогнозування поведінки матеріалу.

#### 1.4 Фізико-хімічні основи процесу лазерного гартування

Процес лазерного гартування базується на швидкому локальному нагріванні металу до температур, що перевищують критичні точки фазових перетворень, з подальшим інтенсивним охолодженням. Його ефективність обумовлена особливостями теплофізичних процесів та фазових змін у металі, зокрема вуглецевих сталях.

#### 1.5 Механізм теплової дії лазерного променя

Коли лазерний промінь взаємодіє з поверхнею матеріалу, відбувається поглинання фотонної енергії електронами та ґраткою кристалічної структури металу. Це призводить до нагріву поверхневого шару зі швидкістю до від  $10^3$  К/с до  $10^6$  К/с. Висока концентрація енергії лазерного променя створює надзвичайно крутий температурний градієнт, обмежуючи нагрів до кількох сотих або десятих міліметра в глибину.

У вуглецевих сталях досягнення температури вище критичної точки  $A_3$  (для перліту) або  $A_1$  (для аустенітизації) викликає перетворення феритно-перлітної структури на аустеніт. Надалі, в процесі самогартування, аустеніт трансформується в мартенсит – дуже твердий, але крихкий фазовий стан [4, 5].

#### 1.6 Фазові перетворення

Основні фазові перетворення в сталях при гартуванні включають:

- перетворення перліту/фериту в аустеніт при нагріванні;

- аустеніт → мартенсит при швидкому охолодженні;
- можливе утворення трооститу або бейніту при недостатній швидкості охолодження.

Формування структури мартенситу забезпечує високу твердість і зносостійкість, що й є метою лазерного гартування.

### 1.7 Кінетика нагрівання та охолодження

Процеси теплопереносу описуються рівняннями теплопровідності, які враховують поглинання енергії лазера, розподіл температури в матеріалі, тепловідвід у глибину, а також конвекцію та випромінювання. Основні параметри, що впливають на процес:

- коефіцієнт теплопровідності;
- теплоємність;
- щільність матеріалу;
- коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання;
- швидкість переміщення лазерного променя.

Сучасні моделі зазвичай враховують нелінійні залежності властивостей матеріалу від температури, що забезпечує більшу точність моделювання.

### 1.8 Хімічні процеси

При високих температурах у зоні впливу лазера можуть відбуватися окиснення поверхні, декаборизація (втрата вуглецю) або зміна хімічного складу. Для зниження цих ефектів процес часто проводиться у захисному середовищі – аргоні, азоті або вакуумі.

## 2 МЕТОДИ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГАРТУВАННЯ

### 2.1 Аналітичні моделі

Математична модель одномірного теплового процесу (рівняння теплопровідності) має вигляд:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \nabla^2 T + Q(x, y, z, t),$$

де  $\rho$  – густина (кг/м<sup>3</sup>);

$c$  – питома теплоємність, Дж/кг·К;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К;

$Q$  – об'ємне джерело тепла, Вт/м<sup>3</sup>;

$T$  – температура, К;

$t$  – час, с.

У класичній моделі Розенталя [5] (рухоме точкове джерело тепла в напівнескінченному тілі):

$$T(x, y, z, t) = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda r} \exp\left(-\frac{V(x-x_0)}{2\alpha}\right),$$

де  $T_0$  – початкова температура;

$q$  – потужність джерела (Вт);

$V$  – швидкість руху джерела (м/с);

$\alpha = \frac{\lambda}{\rho c}$  – температуропровідність (м<sup>2</sup>/с);

$r = \sqrt{(x-x_0)^2 + y^2 + z^2}$  – відстань до джерела.

Для обчислення фазових змін застосовується функція тверднення або інтегральні моделі типу [6]:

$$f_{\text{март}}(T) = \begin{cases} 0, & T > M_s \\ 1 - \exp[-\beta(M_s - T)^n], & T \leq M_s \end{cases},$$

де  $f_{\text{март}}$  – об'ємна частка мартенситу;

$M_s$  – температура початку мартенситного перетворення ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\beta, n$  – емпіричні параметри сталі.

При моделюванні відпалу/рекристалізації можуть враховуватись кінетичні рівняння [6]:

$$X(t) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\tau}\right)^m\right],$$

де  $X(t)$  – ступінь завершення фазового перетворення;

$\tau$  – час настання 63% перетворення;

$m$  – константа Аврамі.

Для об'ємного лазерного нагрівання враховують поглинання випромінювання за законом Бугера-Ламберта [6]:

$$Q(z) = Q_0 e^{-\mu z},$$

де  $\mu$  – коефіцієнт поглинання ( $\text{м}^{-1}$ );

$z$  – глибина проникнення лазерного променя.

В результаті рівняння теплопровідності набуває вигляду:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q_0 e^{-\mu z}.$$

Для двовимірного випадку ( $x$ – $z$ ) з рухомим джерелом:

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q(x, z, t).$$

## 2.2 Облік залишкових напружень

При включенні механічної підсистеми використовується закон Гука для термоеластопластичності:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} (\varepsilon_{kl} - \varepsilon_{kl}^{th} - \varepsilon_{kl}^{pl}),$$

де  $\sigma_{ij}$  – тензор напружень;

$\varepsilon_{kl}$  – повна деформація;

$\varepsilon_{kl}^{th} = \alpha_T (T - T_0) \delta_{kl}$  – термічна деформація;

$\varepsilon_{kl}^{pl}$  – пластична деформація.

Таке мультифізичне моделювання дозволяє передбачити не лише температурні зміни, а й залишкові напруження, які можуть призводити до тріщиноутворення або викривлення деталі.

## 2.3 Огляд сучасних підходів і програмного забезпечення для моделювання лазерної обробки

Сучасні програмні комплекси для моделювання процесів лазерного гартування реалізують мультифізичні математичні моделі, які поєднують теплоперенос, фазові перетворення, механічні напруження, зміни мікроструктури, а також можливості візуалізації результатів і адаптації до конкретних технологічних умов.

COMSOL Multiphysics (рис. 2.1) – одна з найпотужніших платформ для мультифізичного моделювання, яка використовує метод скінченних елементів (FEM).

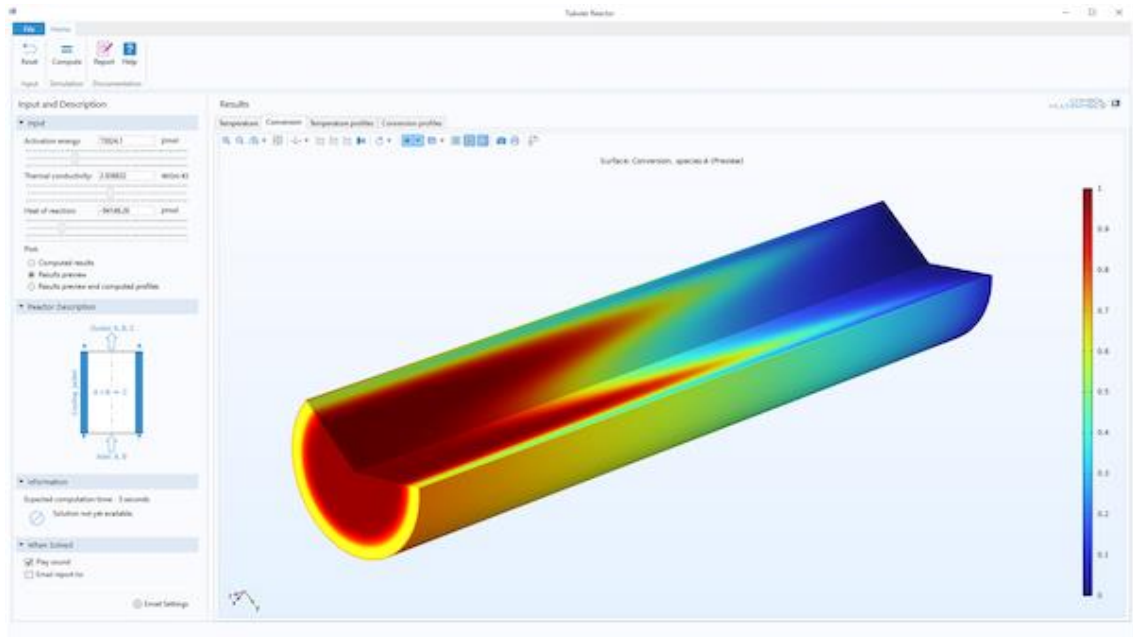


Рисунок 2.1 – Приклад інтерфейсу програми COMSOL Multiphysics

Основні можливості:

- модулі: *Heat Transfer*, *Structural Mechanics*, *Phase Field*, *Metallurgical Transformations*;
- підтримка часових задач (transient), облік температурозалежних властивостей;
- реалізація лазерного джерела як поверхневого або об'ємного теплового навантаження:

$$Q(x, y, t) = \eta \cdot \frac{2P}{\pi R^2} \exp\left(-\frac{2(x - vt)^2 + 2y^2}{R^2}\right),$$

де  $\eta$  – коефіцієнт поглинання;

$P$  – потужність лазера;

$R$  – радіус плями променя;

$v$  – швидкість переміщення.

Переваги COMSOL Multiphysics:

- інтуїтивний інтерфейс;

- автоматична генерація сітки та рішень;
- паралельні обчислення та параметричні дослідження.

ANSYS (рис. 2.2) також забезпечує моделювання лазерних процесів за допомогою модулів Additive Manufacturing Simulation, які інтегруються з Mechanical APDL.

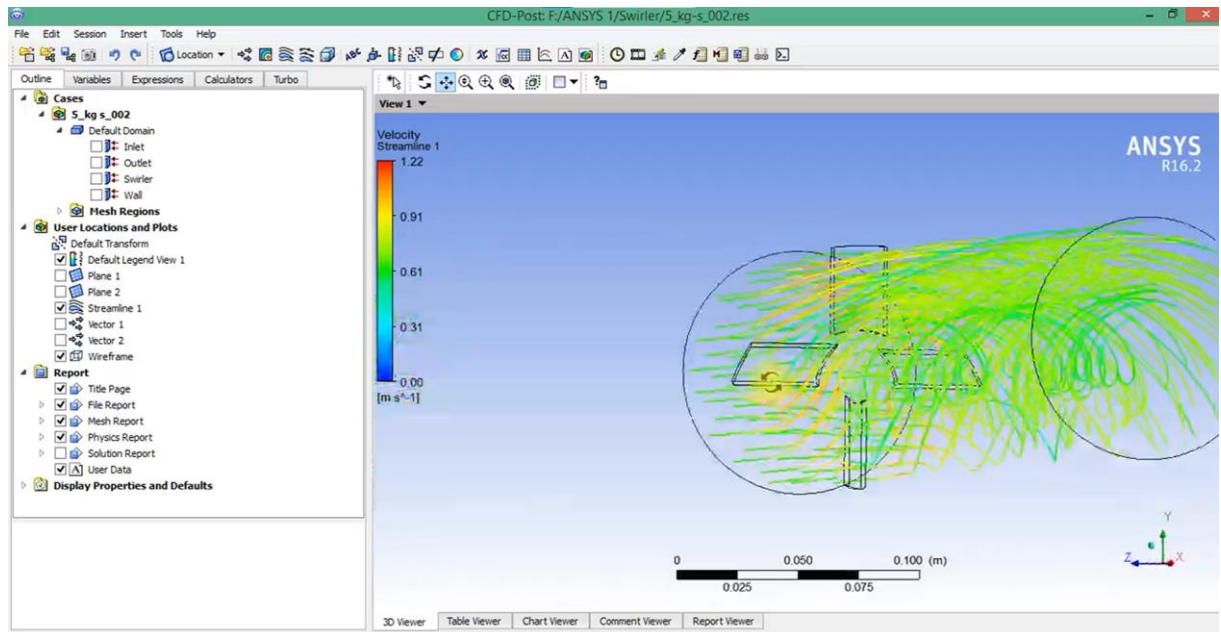


Рисунок 2.2 – Приклад інтерфейсу програми ANSYS Workbench

Основні можливості:

- розрахунок поля температури через модуль Thermal Transient Analysis;
- облік залишкових напружень та деформацій після циклу нагрівання-охолодження;
- застосування власної реалізації закону Фур'є та рівнянь деформацій:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q_{laser}}{\rho c}.$$

Переваги:

- підтримка для моделювання випарування матеріалу, розплавлення, модифікації структури в зоні плавлення;
- гнучка система визначення властивостей матеріалу як функцій від температури:  $\lambda(T)$ ,  $c(T)$ ,  $E(T)$ ,  $\sigma_y(T)$  тощо.

Abaqus (рис. 2.3) – потужний комерційний інструмент, орієнтований на структурні задачі з високою нелінійністю.

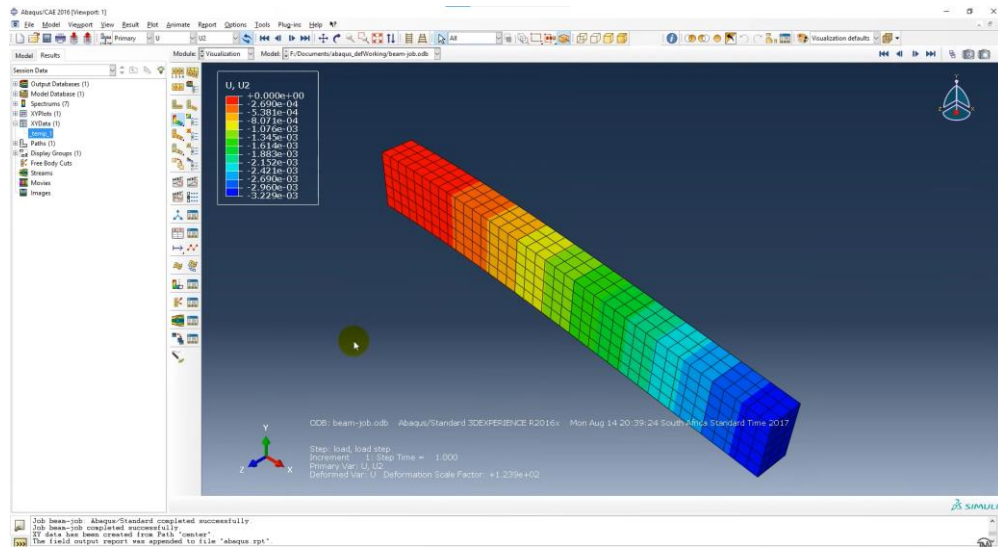


Рисунок 2.3 – Приклад інтерфейсу програми Abaqus CAE

Основні можливості:

- термомеханічне моделювання;
- визначення залишкових напружень і прогноз тріщиноутворення;
- підтримка підключення до Python для автоматизації.

Abaqus дозволяє реалізовувати власні математичні функції у вигляді підпрограм UMAT/Thermal Models, в яких користувач задає:

$$\sigma = f\left(\varepsilon, T, \dot{\varepsilon}, \text{фаза}\right).$$

OpenFOAM (рис. 2.4) – безкоштовна open-source CFD/мультифізична платформа.

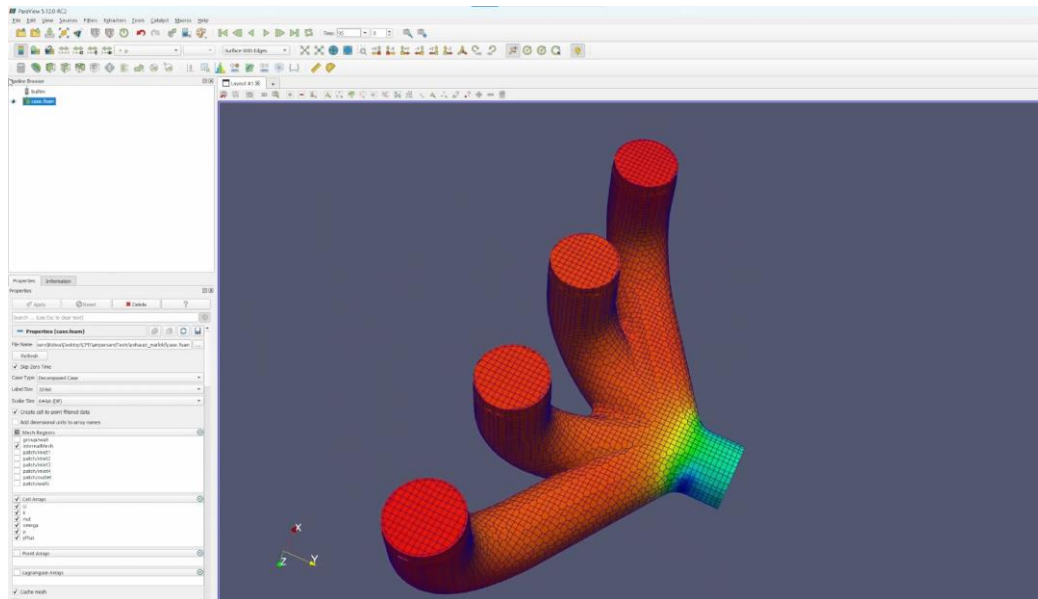


Рисунок 2.4 – Приклад інтерфейсу програми OpenFOAM

Основні характеристики:

- використання методу скінченних об’ємів (FVM);
- можливість моделювання 3D-динаміки температурного поля в об’ємі металу;
- висока гнучкість: можна реалізувати будь-яке рівняння виду:

$$\frac{\partial(\rho c T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho c \vec{v} T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + Q.$$

Оскільки програма безкоштовна, вона має певні недоліки:

- вимагає знання програмування (C++ або bash);
- відсутній графічний інтерфейс для початківців.

Simufact Welding (рис. 2.5) – спеціалізоване ПЗ для лазерної обробки, зварювання та адитивних технологій, де вже реалізовані всі необхідні фізичні моделі.

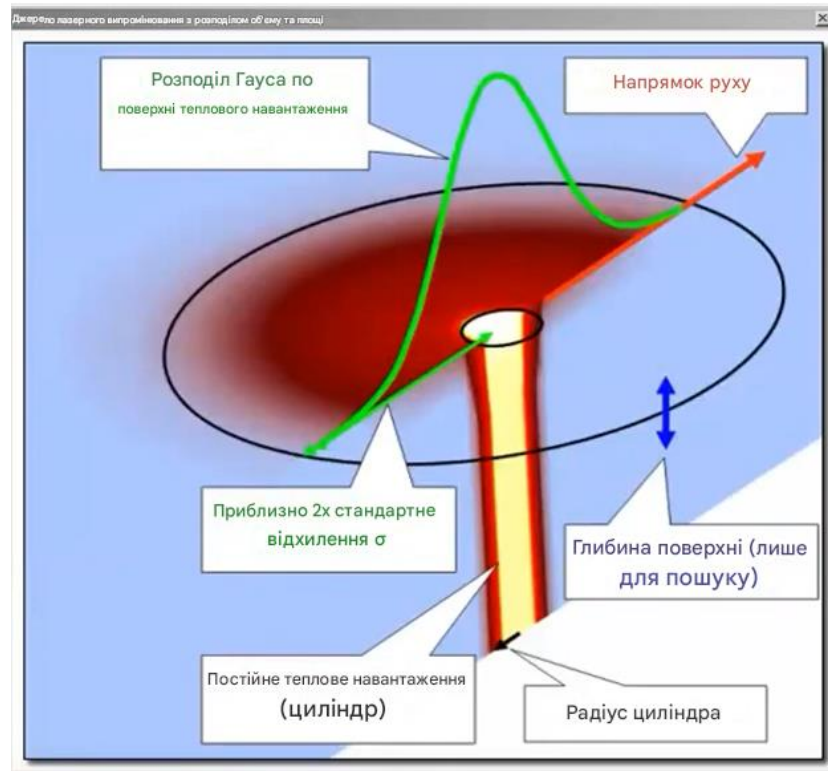


Рисунок 2.5 – Приклад інтерфейсу Simufact Welding

Основний функціонал:

- пряме моделювання траєкторії лазера;
- побудова теплових циклів для кожної точки;
- автоматичне врахування ТТТ/ССТ діаграм для передбачення фаз.

## 2.4 Узагальнення можливостей

В таблиці 2.1 наведено порівняння можливостей розглянутих програм.

Таблиця 2.1 – Порівняння можливостей програм

ПЗ	FEM	Механіка	Фазові переходи	Візуалізація	Монетизація
COMSOL	Так	Так	Так	Так	Платна
ANSYS	Так	Так	Так	Так	Платна
Abaqus	Так	Так	Є обмеження(через UMAT)	Так	Платна
OpenFOAM	Є обмеження	Є обмеження	Є обмеження	Є обмеження	Безкоштовна
Simufact	Так	Так	Так	Так	Платна

Математичне моделювання процесів лазерного гартування активно застосовується в експериментальних дослідженнях, проектуванні обладнання, оптимізації режимів обробки, а також у діагностиці та попередженні дефектів у реальних умовах виробництва.

## 2.5 Дослідження температурних полів при лазерному нагріванні

У одному дослідженні було проведено числове моделювання лазерного гартування сталі 45 з використанням COMSOL. Було побудовано температурне поле для лазера потужністю  $P = 1,5$  кВт, при швидкості переміщення  $v = 5$  мм/с.

Модель:

- теплопровідність:  $\lambda(T) = \lambda_0(1 + aT)$ ;
- визначення температури аустенізації:  $T_A \approx 750$  °С;
- профіль температурного поля:

$$T(x, z) = T_0 + \frac{q}{2\pi\lambda} \cdot \frac{1}{\sqrt{x^2 + z^2}} \cdot \exp\left(-\frac{\nu x}{2\alpha}\right).$$

Результати:

- максимальна глибина зони гартування – 0,9 мм;
- час утримання при температурі  $> T_A$  становив 1,2 с.
- результати узгоджуються з експериментальними термограмами з похибкою  $< 5 \%$ .

## 2.6 Прогнозування фазових перетворень у вуглецевих сталях

У іншому дослідженні використано Abaqus + власну підпрограму UMAT для моделювання фазового перетворення перліт  $\rightarrow$  аустеніт  $\rightarrow$  мартенсит в сталі У10.

Алгоритм:

- облік ТТТ-діаграм для аустенітної трансформації;
- розв'язання рівняння Кольмогорова-Яворського:

$$X(t) = 1 - \exp(-k(T)t^n), k(T) = k_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right).$$

Результати:

- частка мартенситу залежить від швидкості охолодження:  $>90\%$  при  $100^\circ\text{C}$ ;
- паралельне моделювання залишкових напружень показало компресійне напруження до 200 МПа в поверхневому шарі;
- узгодження з мікроструктурною експертизою – добре.

## 2.7 Оптимізація траєкторії лазерного променя у Simufact

У рамках проекту по обробці штоків використовувалося програмне моделювання з метою оптимізації траєкторії лазера.

Ціль:

- мінімізувати перегрів і уникнути розплавлення;

- отримати гартовану зону з глибиною від 1 мм до 1,2 мм і твердістю > 60 HRC.

Моделювання:

- визначення температурного поля та часу експозиції:

$$\Delta t_{\text{ауст}} = \frac{\Delta z^2}{4\alpha}, \text{ при } T > 800^\circ\text{C}.$$

- визначення ефективної площі гартування:

$$A = \iint_{T(x,y) > T_A} dx dy .$$

Результати:

- час лазерного проходу зменшено на 12%, при тому сама зона гартування збереглась стабільною;
- уникнуто появи тріщин та деформацій.

## 2.8 Власний експеримент

У якості власного експерименту було обрано оцінку температурного розподілу по глибині вуглецевої інструментальної сталі, внаслідок одного імпульсу лазерного випромінювання. Такий підхід дозволяє наближено визначити зону термічного впливу й оцінити доцільність використання лазерної технології для поверхневого гартування. Для прикладу гартування вуглецевої інструментальної сталі була обрана сталь марки У8А, яка часто використовується в машинобудуванні для виготовлення ріжучого та штампового інструменту. Її хімічний склад включає приблизно від 0,75 % до 0,84 % вуглецю, що забезпечує добру загартовуваність. У якості лазера був обраний імпульсний Nd:YAG-лазер (на ітрієво-алюмінієвому гранаті, активований неодимом), який є поширеним джерелом випромінювання в

обробці металів завдяки своїй здатності створювати короткі енергоємні імпульси.

Обробка металів з використанням Nd:YAG-лазера, більш ефективна в порівнянні з обробкою CO<sub>2</sub>-лазером. Використання випромінювання з іще меншою довжиною хвилі, наприклад, УФ, обмежується малою потужністю УФ-лазерів або їх високою вартістю [7, 8].

Вхідні дані лазера:

- потужність імпульсу:  $P = 1000$  Вт;
- тривалість імпульсу:  $\tau = 0,01$  с.

Фізико механічні характеристики сталі У8А:

- густина:  $\rho = 7850$  (кг/м<sup>3</sup>);
- питома теплоємність:  $c = 460$  (Дж/(кг×К));
- температуропровідність:  $\alpha = 11,7 \times 10^{-6}$  (м<sup>2</sup>/с).

Для розрахунку температурного підвищення використано формулу:

$$\Delta T = \frac{Q}{\rho \cdot c \cdot V},$$

де  $Q = P \cdot \tau = 1000 \cdot 0,01 = 10$ , Дж – енергія імпульсу;

$V = \pi r_0^2 \cdot l = \pi \cdot (0,001)^2 \cdot 0,000342 = 1,074 \cdot 10^{-9}$ , м<sup>3</sup> – об'єм нагрітого шару;

$l = \sqrt{11,7 \cdot 10^{-6} \cdot 0,01} = 0,000342$ , м – глибина теплового проникнення.

Підставляючи значення отримуємо:

$$\Delta T = \frac{10}{7850 \cdot 460 \cdot 1,074 \cdot 10^{-9}} \approx 2580^\circ \text{C}.$$

Таким чином, температурне підвищення становить приблизно 2580 °С.

Після отриманих результатів було обчислено температурний розподіл за допомогою експоненціальної формули розподілу температури:

$$T(z) = \Delta T \cdot e^{-z/l}, \quad (2.1)$$

де  $T(z)$  – температура в точці на глибині  $z$ ;

$\Delta T = 2580 \text{ }^\circ\text{C}$  – максимальне температурне підвищення на поверхні (тобто, при  $z = 0$ );

$z$  – глибина, м;

$l = \sqrt{\alpha \cdot \tau}$  – глибина теплового проникнення, м.

Таким чином, за допомогою формули (2.1) було створено графік (рис. 2.6).

Температурний розподіл по глибині при імпульсному лазерному гартуванні

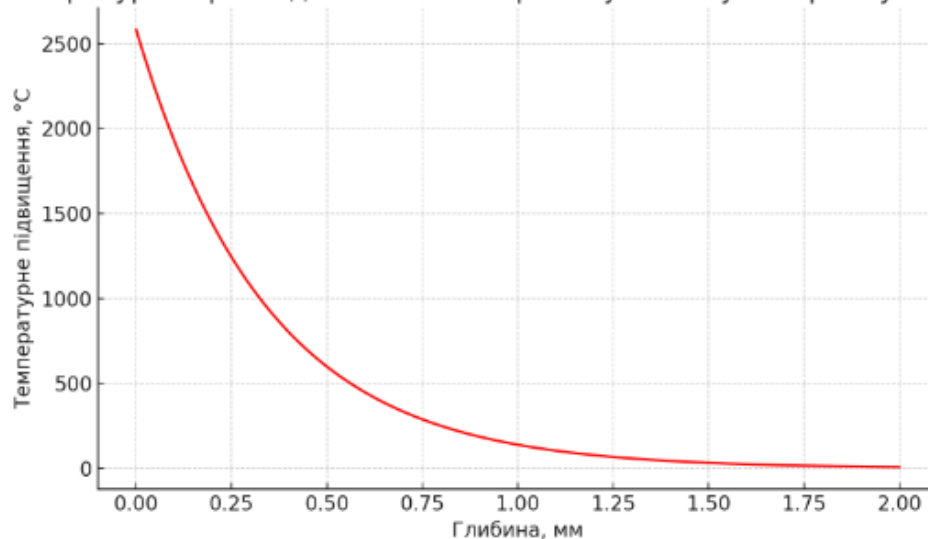


Рисунок 2.6 – Температурний розподіл по глибині при імпульсному лазерному гартуванні

Як видно на графіку, основна частина тепла поглинається у верхньому шарі завтовшки менше 0,5 мм, що підтверджує поверхневу природу процесу.

## 2.9 Підсумки

Отже, після дослідження експериментів, можна сказати, що аналітичне моделювання дозволяє отримати уявлення про поведінку температурних

полів і зон фазових перетворень у сталях під час лазерного гартування. Проте для врахування реальних умов (змінна теплопровідність, складна геометрія, конвективне охолодження) доцільно поєднувати аналітичні підходи з чисельним моделюванням.

### 3 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ТРУДНОЩІВ І ПЕРСПЕКТИВ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ У МОДЕЛЮВАННІ ЛАЗЕРНОГО ГАРТУВАННЯ

Попри значний прогрес у математичному та чисельному моделюванні, моделювання процесів лазерного гартування все ще стикається з низкою наукових, технологічних і обчислювальних викликів. У цьому розділі систематизовано основні проблеми, а також окреслено напрями, у яких зосереджуються сучасні дослідження.

#### 3.1 Нелінійність фізичних властивостей матеріалів

Властивості металів суттєво змінюються з температурою:

- теплопровідність  $\lambda(T)$ ;
- модуль пружності  $E(T)$ ;
- межа текучості  $\sigma_y(T)$ ;
- коефіцієнт теплового розширення  $\alpha(T)$ .

Це створює труднощі в реалізації стійких та точних чисельних схем, особливо в задачах з фазовими переходами та швидкими градієнтами температури.

#### 3.2 Моделювання фазових перетворень

Фазові переходи (перліт  $\leftrightarrow$  аустеніт  $\leftrightarrow$  мартенсит) залежать не тільки від температури, а й від швидкості нагрівання та охолодження. Класичні моделі типу JMAK або TTT/CCT-діаграм не завжди точно описують реальний кінетичний процес, особливо при нестандартних режимах лазерного впливу.

Основні труднощі:

- необхідність адаптації до нестационарних теплових умов;
- відсутність точних кінетичних параметрів для багатьох сталей;

– неможливість опису комбінованих фазових структур без експериментальних даних.

### 3.3 Врахування залишкових напружень

Після гартування у виробі виникають залишкові термічні та фазові напруження, які можуть спричинити тріщини або викривлення.

Основні причини труднощів:

- складність зв'язку між температурними циклами та мікроструктурною трансформацією;
- необхідність розв'язання пов'язаних задач тепло-пружності з урахуванням пластичності;
- висока обчислювальна складність 3D-моделей.

### 3.4 Труднощі валідації моделей

Одним з головних викликів є верифікація та валідація результатів чисельного моделювання:

- необхідність точного вимірювання температурного поля в реальному часі (пірометри, ІЧ-камери);
- вимірювання мікроструктури в тонких шарах (до 1 мм);
- контроль твердості та напружень без руйнування виробу.

Часто реальні умови значно складніші за моделі – урахування конвекції, відбивання, геометричної складності поверхні є нетривіальним завданням.

### 3.5 Обмеження обчислювальних ресурсів

Сучасні тривимірні моделі з урахуванням:

- нелінійних температурозалежних властивостей;
- власних фазових перетворень;

- анізотропії матеріалів;
- динаміки лазерного джерела в реальному часі

Через це вимагаються величезні обчислювальні потужності та велика кількість оперативної пам'яті, особливо при високій роздільній здатності.

### 3.6 Перспективи подальших досліджень

Удосконалення моделей фазових перетворень:

- розробка термодинамічних моделей, які враховують не лише температуру, а й її зміну з часом;
- впровадження інтерфейсних моделей типу Phase-Field для опису еволюції мікроструктури.

Інтеграція з методами штучного інтелекту:

- використання нейронних мереж для прогнозування глибини гартування;
- застосування алгоритмів машинного навчання для оптимізації параметрів гартування на основі експериментальних баз.

Розвиток гібридного моделювання:

- комбінація експерименту + моделювання для калібрування параметрів;
- підключення цифрових двійників до виробничих ліній.

Отже, можна сказати, що моделювання лазерного гартування знаходиться на стику фундаментальних наук і прикладної інженерії. Його подальший розвиток пов'язаний з:

- зміцненням математичних моделей;
- підвищенням точності фізичних параметрів;
- інтеграцією з IT-рішеннями (ШІ, цифрові двійники);
- а також з удосконаленням інструментів валідації.

Це дозволить зробити моделювання не лише аналітичним інструментом, а й інтегрованою частиною виробничого циклу.

## ВИСНОВКИ

У кваліфікаційні роботі було розглянуто сучасний стан досліджень і практичного застосування математичного моделювання процесів лазерного гартування, зокрема для вуглецевих інструментальних сталей. Основні висновки можна сформулювати так.

Актуальність теми. Математичне моделювання лазерного гартування є одним із ключових напрямів цифровізації технологій обробки матеріалів, що дозволяє:

- скоротити витрати на експерименти;
- прогнозувати якість обробки;
- адаптувати процес під конкретні конструкції [9].

Особливо це важливо для вуглецевих сталей, що широко застосовуються у виробництві інструментів та деталей з підвищеними вимогами до зносостійкості.

Також було проведено експеримент з математичного моделювання температурного розподілу по глибині вуглецевої інструментальної сталі марки У8А, внаслідок одного імпульсу лазерного випромінювання Nd:YAG-лазера, який є поширеним джерелом випромінювання в обробці металів завдяки своїй здатності створювати короткі енергоємні імпульси. У результаті проведеного експерименту було отримано данні які показують що, основна частина тепла поглинається у верхньому шарі завтовшки менше 0.5 мм, що підтверджує поверхневу природу процесу.

Математичні моделі. Базовим підходом є вирішення рівняння теплопровідності з урахуванням джерела тепла від лазера:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \nabla^2 T + \frac{q(x, y, z, t)}{\rho c}.$$

Розширені моделі включають:

- температурозалежні властивості;
- фазові перетворення (мартенсит, аустеніт);
- залишкові напруження.

Для цього застосовуються методи:

- скінченних різниць (FDM);
- скінченних елементів (FEM);
- методи Монте-Карло;
- фазові поля.

Практичне застосування.

Моделювання дозволяє:

- проектувати траєкторії лазера;
- оптимізувати параметри (потужність, швидкість, фокус);
- передбачити структуру й твердість гартованої зони;
- зменшити ймовірність тріщиноутворення та деформацій.

Огляд реальних досліджень показав відповідність чисельних результатів експериментальним даним з точністю від 5 % до 10 % [10].

Основні труднощі.

До ключових проблем моделювання відносяться:

- складність врахування нелінійних властивостей матеріалів;
- потреба в точних параметрах фазових переходів;
- великі обчислювальні ресурси для 3D-моделей;
- складна валідація результатів на практиці.

Перспективи розвитку. Найперспективнішими напрямками вважаються:

- застосування нейромереж і ШІ для прогнозування параметрів гартування;
- інтеграція з цифровими двійниками виробів;
- створення універсальних бібліотек властивостей металів;
- автоматизація та онлайн-контроль процесу гартування.

Підбиваючи підсумки, моделювання лазерного гартування – це ефективний інструмент, що сприяє розвитку сучасного виробництва. Його роль у забезпеченні надійності, точності та ефективності технологій обробки матеріалів буде лише зростати в умовах індустрії.

**ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ**

1. Зміцнення і легування деталей машин променем лазера / В.С.Коваленко, Л.Ф. Головка, В.С. Черненко. Київ: Техніка, 1990. 192с.
2. Формування структури і властивостей при лазерній поверхневій обробці: монографія / за ред. П.Р. Гнатюка. Тернопіль: ТНТУ, 2022. 4 с.
3. Пупан Ю.О. Лазерні технології у машинобудуванні: навч. посіб. / Ю.О. Пупан, В.В. Сахно. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 38-39 с.
4. Жуков, О. А., Жигуц, Ю. Ю., Шиліна, Е. П. Комбінована обробка за допомогою лазерного поверхневого зміцнення і саморозповсюджувального високотемпературного синтезу // Наук. вісник УжНУ. Фізика. 2001. Вип. 10. С. 31–34.
5. Rosenthal D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments. // Transactions of the ASME, 1946. Vol. 68, No 8. P. 849–866.
6. Лазерні технології: конспект лекцій / уклад. Ю.О. Пупан. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 236-247 с.
7. Сігов В.І. Методи локальної поверхневої обробки деталей машин: навч. посіб. Суми: СумДУ, 2008. 46 с.
8. Лазерна поверхнева обробка матеріалів / Афанасьєва О.В., Лалазарова Н.О., Федоренко Є.П. Харків : ФОП Панов А.М., 2020. 100 с.
9. Duley W.W. Laser Processing and Analysis of Materials. Springer, 1983. 234 p.
10. Ready J.F. Effects of High-Power Laser Radiation. Academic Press, 1971. 489 p.