

2025 p.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет _____ Електронної та біомедичної інженерії _____

Кафедра _____ Фізичних основ електронної техніки _____

Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____

Спеціальність _____ 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна 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
КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві _____ Кириченку Данилу Сергійовичу _____ у _____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи роботи Дослідження впливу довжини хвилі лазерного випромінювання на ефективність лазерного гартування 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: технічні характеристики лазерів; властивості сталей; для діаграма Fe–C; результати досліджень мікроструктури та твердості після гартування.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

1 Вступ. 2 Аналіз питань лазерного гартування сталей та постановка задач дослідження.

3 Теоретичний аналіз впливу довжини хвилі лазерного випромінювання на ефективність лазерного гартування сталей. 4. Розрахунки характеристик лазерної обробки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій.

Демонстраційний матеріал – 11 слайдів

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Інформаційно-тематичний пошук та огляд літературних джерел про лазерну обробку інструментальних матеріалів	08.05.25–18.05.25	Виконано
2	Дослідження лазерної обробки інструментальних матеріалів	19.05.25–23.05.25	Виконано
3	Виконання чисельних розрахунків характеристик лазерної обробки інструментальних матеріалів	24.05.25–29.05.25	Виконано
4	Аналіз розрахунків та параметрів лазерної обробки інструментальних матеріалів	30.05.25–02.06.25	Виконано
5	Оформлення пояснювальної записки	03.06.25–11.06.25	Виконано
6	Оформлення демонстраційних матеріалів	12.06.25–14.06.25	Виконано
7	Проходження нормоконтролю та перевірки на академічний плагіат	15.06.25–19.06.25	Виконано
8	Отримання відгуку та рецензії	20.06.25–21.06.25	Виконано
9	Підготовка та захист кваліфікаційної роботи	22.06.25–24.06.25	Виконано

Дата видачі завдання 05 травня 2025 р.

Здобувач _____
(підпис)

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

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка кваліфікаційної роботи: 35 с., 9 рис., 1 додаток, 12 джерел.

ДОВЖИНА ХВИЛІ, ЛАЗЕРНЕ ГАРТУВАННЯ, МАРТЕНСИТ, МІКРОСТРУКТУРА, СТАЛІ, ТВЕРДІСТЬ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ, ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ. CO₂-ЛАЗЕР, ND:YAG.

Об'єкт дослідження – процес лазерного гартування сталей.

Метою кваліфікаційної роботи є дослідження впливу довжини хвилі лазерного випромінювання на ефективність термічної обробки сталей, зокрема на глибину загартованого шару, мікроструктуру та розподіл твердості.

Метод дослідження – теоретичний та експериментальний.

Для досягнення мети в роботі поставлено та вирішено такі завдання:

1. Проаналізувати сучасний стан досліджень у сфері лазерного гартування сталей та виділити ключові напрямки.
2. Визначити фізичні особливості впливу довжини хвилі на поглинання енергії поверхнею металу.
3. Розглянути мікроструктурні зміни при застосуванні Nd:YAG, волоконного та CO₂-лазера.
4. Сформулювати технічні рекомендації щодо вибору довжини хвилі для оптимізації процесу лазерного гартування.

ABSTRACT

Explanatory note of the qualification work: 35 p., 9 figures, 1 appendix, 12 sources.

WAVELENGTH, LASER HARDENING, MARTENSITE,
MICROSTRUCTURE, STEELS, HARDNESS, THERMAL CONDUCTIVITY,
PHASE TRANSFORMATIONS. ND:YAG, CO₂ LASER,

The object of study is the process of laser hardening of steels.

The purpose of the qualification work is to study the effect of laser wavelength on the efficiency of heat treatment of steels, in particular on the depth of the hardened layer, microstructure and hardness distribution.

The research method is theoretical and experimental.

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

1. Analyze the current state of research in the field of laser hardening of steels and identify key areas.
2. To determine the physical features of the wavelength effect on energy absorption by the metal surface.
3. To consider microstructural changes when using Nd:YAG, fiber and CO₂ lasers.
4. Formulate technical recommendations for choosing a wavelength to optimize the laser hardening process.

ЗМІСТ

Вступ.....	7
1 Огляд літературних джерел з питань лазерного гартування сталей та постановка завдань дослідження.....	8
1.1 Сучасний стан досліджень у сфері лазерного гартування сталей	8
1.2 Вплив довжини хвилі лазерного випромінювання на гартування сталей.....	10
1.3 Методологічні виклики у вивченні лазерного гартування сталей	12
1.4 Узагальнення сучасного стану лазерного гартування: огляд	20
ключових тенденцій і практик	15
1.5 Постановка задачі дослідження.....	16
2 Аналіз впливу довжини хвилі лазерного випромінювання на ефективність лазерного гартування сталей	18
2.1 Роль лазерного гартування у підвищенні експлуатаційних характеристик сталевих виробів.....	18
2.2 Мета, завдання, об'єкт і предмет дослідження.....	23
2.3 Результати досліджень.....	26
Висновки	33
Перелік джерел посилання	34
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	36

ВСТУП

У сучасному промисловому виробництві зростає потреба у вдосконаленні способів термічної обробки матеріалів, здатних забезпечити підвищену зносостійкість, міцність та довговічність деталей зі сталі без значних витрат енергії та часу. На тлі цих вимог лазерне гартування утвердилося як перспективна технологія поверхневого зміцнення, що дозволяє реалізувати високоточну локальну обробку з мінімальними втратами ресурсів

Сутність лазерного гартування полягає у фокусуванні променя лазера на поверхні сталевих виробів. За рахунок високої щільності енергії відбувається миттєвий нагрів до температури аустенітизації з подальшим самоохолодженням унаслідок теплопровідності в основний метал. Такий процес забезпечує утворення мартенситної структури, що суттєво покращує твердість і зносостійкість поверхневого шару

Однак, незважаючи на широку апробацію цієї технології, у науковому середовищі досі не існує однозначної відповіді на питання: як саме впливає довжина хвилі лазерного випромінювання на результати гартування? Різні типи лазерів – CO₂, Nd:YAG, волоконні – генерують випромінювання в різних діапазонах, і кожен з них демонструє відмінну ефективність взаємодії з металами. Від довжини хвилі залежить коефіцієнт поглинання енергії поверхнею сталі, а отже – швидкість нагрівання, глибина загартованого шару та морфологія мікроструктури.

Метою цієї кваліфікаційної роботи є встановлення закономірностей між довжиною хвилі лазерного випромінювання та ефективністю лазерного гартування сталей. Результати цієї роботи можуть бути використані для вдосконалення технологій поверхневого зміцнення в машинобудуванні, енергетиці, аерокосмічній галузі та інших сферах, де критично важливе поєднання високої твердості та довговічності сталевих елементів.

ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ З ПИТАНЬ ЛАЗЕРНОГО ГАРТУВАННЯ СТАЛЕЙ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Сучасний стан досліджень у сфері лазерного гартування сталей

Лазерне гартування є однією з ключових сучасних технологій, яка використовується для підвищення зносостійкості, твердості та експлуатаційних характеристик сталевих виробів. На відміну від традиційних методів термічної обробки, таких як ТВЧ-гартування, цементація чи азотування, лазерна технологія забезпечує точкове, високошвидкісне та кероване введення теплової енергії в матеріал. Завдяки цьому вдається мінімізувати зони термічного впливу, уникнути значних деформацій та забезпечити локальну обробку поверхні складної геометрії [1].

Принцип дії лазерного гартування ґрунтується на фокусуванні лазерного променя на поверхні матеріалу (рис. 1.1). Поверхневий шар миттєво нагрівається до температури аустенітизації (від 900 °C до 950 °C) для середньовуглецевих сталей), після чого відбувається швидке охолодження внаслідок відводу тепла в холодні шари основного металу.

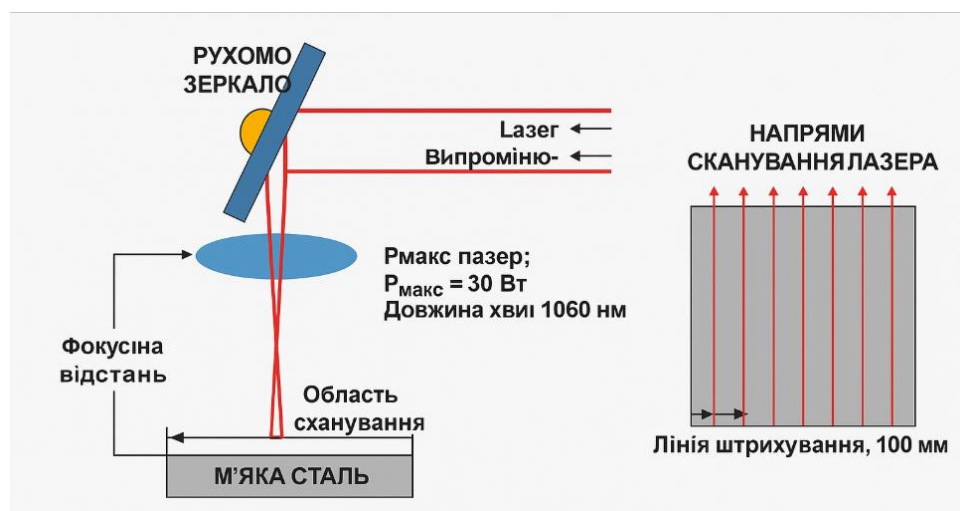


Рисунок 1.1 – Принцип дії лазерного гартування: локальне нагрівання та самоохолодження [1]

Внаслідок цього формується дрібнозернистий мартенсит – тверда фаза з високою зносостійкістю. Застосування лазерів дозволяє точно контролювати геометрію обробки, глибину загартованого шару та уникати перегріву матеріалу [2]. Залежно від типу використовуваного лазера (CO_2 , Nd:YAG, волоконний) та технологічних параметрів (потужність, швидкість сканування, діаметр плями, імпульсний або безперервний режим) досягаються різні результати в контексті глибини, мікроструктури та механічних характеристик загартованого шару. Сучасні дослідження доводять, що лазерне гартування особливо ефективно для зміцнення компонентів, що піддаються високим динамічним або абразивним навантаженням – таких як зубчасті колеса, вали, шестерні, лопатки турбін тощо.

При лазерному гартуванні сталь швидко нагрівається до температури вище A_3 або між A_1 і A_3 (залежно від складу), переходячи в аустенітну фазу. Подальше надшвидке охолодження блокує дифузійні перетворення, і замість перліту або бейніту утворюється мартенсит – перенасичений розчин вуглецю в α -залізі з характерною голчастою структурою (рис. 1.2).

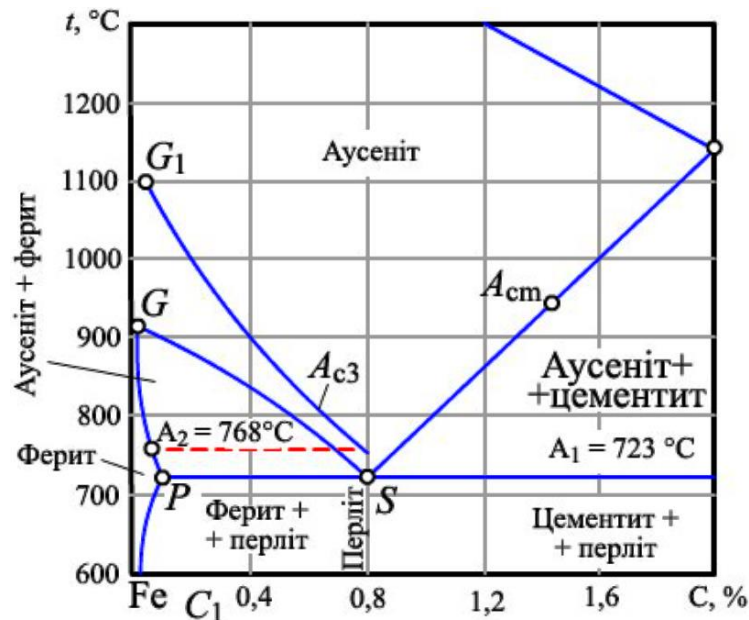


Рисунок 1.2 – Схема формування мартенситної структури при лазерному гартуванні

Зображена діаграма стану системи залізо-вуглець демонструє зміну фазового складу сталі залежно від вмісту вуглецю та температури. Основними фазами є ферит, аустеніт, цементит та їх комбінації. Головні критичні точки: $A_1 = 723\text{ }^{\circ}\text{C}$ – точка початку перетворення перліту в аустеніт при нагріванні. A_3 , A_{cm} – межі аустенітної області для гіпо- та гіперевтектоїдних сталей відповідно. $A_2 = 768\text{ }^{\circ}\text{C}$ – точка магнітного переходу фериту (не впливає на фазову структуру, але важлива при фізичних змінах) [3].

1.2 Вплив довжини хвилі лазерного випромінювання на гартування сталей

Одним із малодосліджених, але критично важливих параметрів лазерного гартування є довжина хвилі випромінювання. Довжина хвилі – це фізична характеристика електромагнітного випромінювання, яка визначає відстань між двома послідовними максимумами хвиль. У контексті лазерної обробки металів вона безпосередньо впливає на ефективність поглинання енергії поверхнею матеріалу.

Поглиналина здатність металу залежить від його оптичних властивостей і взаємодії з випромінюванням певної довжини хвилі. У загальному випадку, чим коротша довжина хвилі лазерного випромінювання, тим вища ймовірність її поглинання металом (рис. 1.3). Це пояснюється тим, що короткохвильове випромінювання має вищу фотонну енергію та краще взаємодіє з електронною структурою поверхні матеріалу.

Таким чином, вибір довжини хвилі визначає не лише кількість поглинутої енергії, але й характер розподілу тепла в поверхневому шарі, що критично важливо для керування мікроструктурними перетвореннями при лазерному гартуванні [3].

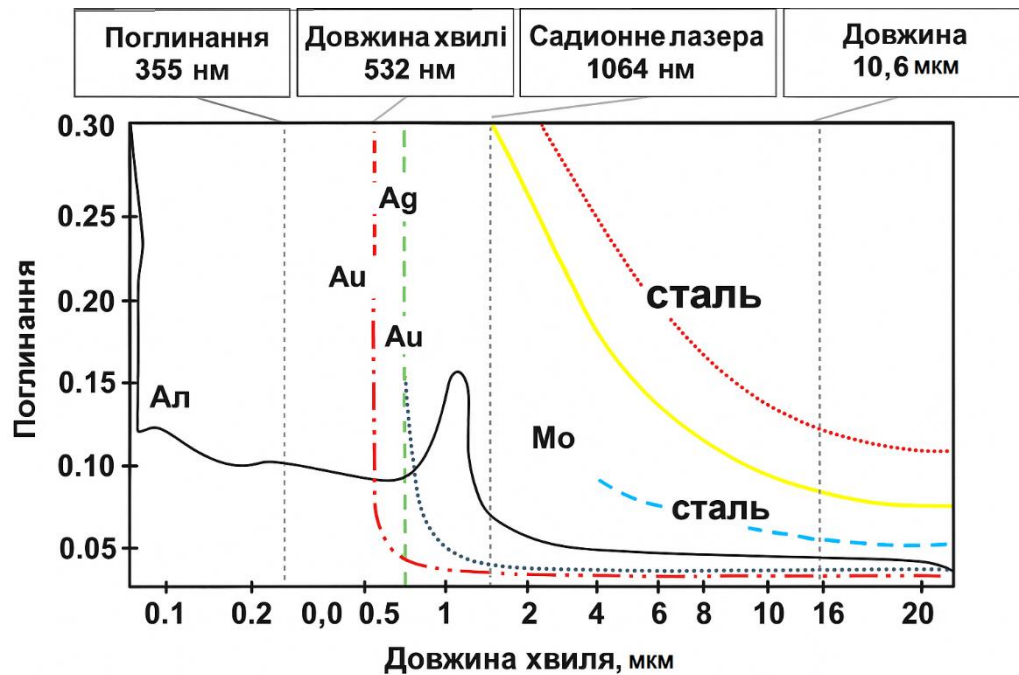


Рисунок 1.3 – Спектральна залежність коефіцієнта поглинання сталі від довжини хвилі лазерного випромінювання

У дослідженні [4] розглянуто вплив довжини хвилі лазерного випромінювання на формування мікроструктури сталі 45 при використанні твердотілого Nd:YAG-лазера з довжиною хвилі 1,064 мкм. Встановлено, що така довжина хвилі дозволяє досягти рівномірного та контрольованого проникнення енергії в матеріал. Внаслідок локального нагрівання до температур вище критичних точок A_3 та A_1 і подальшого швидкого охолодження, в структурі формується мартенсит із дрібнозернистою морфологією.

Порівняльні експерименти з використанням CO_2 -лазера при тих самих умовах показали менш ефективне поглинання, нерівномірний розподіл температури та утворення неоднорідної структури.

Ці результати свідчать про те, що довжина хвилі 1,064 мкм забезпечує баланс між глибиною теплового впливу і здатністю до формування однорідної зміцненої зони. Важливим є також зменшення ймовірності утворення тріщин на межі фазового переходу, що покращує довговічність деталей після обробки.

Зменшення довжини хвилі позитивно впливає на якість обробки, що показало дослідження [5], метою якого було визначення оптимальних параметрів обробки, які забезпечують максимальну твердість та структурну цілісність поверхні та оцінити ефективність використання імпульсного волоконного лазера з довжиною хвилі 532 нм для поверхневого зміцнення сталі марки 40Cr.

Результати експерименту показали, що при довжині хвилі 532 нм досягається рівномірний розподіл твердості по глибині загартованого шару, при цьому максимальна мікротвердість у поверхневій зоні сягала понад 780 HV. Також було встановлено зниження ризику утворення мікротріщин і деформацій, що свідчить про більш делікатну взаємодію короткохвильового випромінювання з матеріалом. Глибина загартованого шару становила близько 0,7 мм, спостерігається відсутність порушень суцільності структури, що свідчить про стабільний тепловий режим і високу якість процесу [5].

Це дослідження підтвердило доцільність використання зеленого лазера у високоточних технологіях зміцнення відповідальних деталей, де необхідна обмежена глибина обробки та високі механічні характеристики.

1.3 Методологічні виклики у вивченні лазерного гартування сталей

Попри стрімкий розвиток лазерних технологій у металургії, залишаються невирішені аспекти, які стримують їхнє широкомасштабне впровадження в промисловість. Одним із ключових викликів є відсутність уніфікованих підходів до вибору довжини хвилі лазерного випромінювання для різних марок сталей. Більшість досліджень зосереджуються на випробуваннях одного типу лазера, наприклад CO₂ або Nd:YAG, що не дозволяє повноцінно порівняти ефективність різних довжин хвиль в однакових умовах обробки.

Крім того, значна частина досліджень виконується без урахування специфічних вимог до мікроструктури та твердості поверхневого шару, що

застосовуються в різних галузях – від авіаційної до енергетичної. У цих сферах властивості сталі мають відповідати різним експлуатаційним умовам: наприклад, в авіаційній галузі важлива втомна міцність і легкість конструкцій, а в енергетиці – термостійкість і корозійна стійкість. Зростання твердості не завжди є достатнім показником ефективності термічної обробки, якщо не враховуються параметри структури, які забезпечують комплекс механічних властивостей. Наприклад, сталеві елементи в умовах циклічного навантаження потребують не лише високої твердості, а й оптимального балансу з в'язкістю, що залежить від параметрів фазових перетворень під час гартування. Відповідно, недостатньо лише констатувати зростання твердості – необхідно досліджувати повний спектр мікроструктурних змін.

Ще однією проблемою є обмеженість статистичної бази. У ряді сучасних досліджень результати ґрунтуються на експериментах з невеликою кількістю зразків або проводяться в умовах обмеженого діапазону технологічних параметрів, що не дозволяє виявити повну варіативність результатів. Такі дослідження часто ігнорують вплив сторонніх чинників, як-от неоднорідність матеріалу або зміни в тепловому середовищі, що суттєво впливають на точність і відтворюваність результатів. Унаслідок цього стає складно сформувати достовірні емпіричні моделі, які могли б слугувати основою для інженерних рішень у промисловості. Така методика не дозволяє повноцінно перевірити та узагальнити отримані результати, що ускладнює валідацію моделей теплопереносу і фазових перетворень, які застосовуються при лазерному гартуванні. У результаті моделювання часто не відображає реальних умов промислового виробництва.

Існує також потреба у створенні відкритих баз даних, що містять експериментальні характеристики поглинання енергії при різних довжинах хвиль, враховуючи температуру, поверхневу шорсткість та хімічний склад сталі. Така потреба зумовлена високою залежністю ефективності лазерного гартування від властивостей поверхні оброблюваного матеріалу. Наприклад, навіть незначні зміни в складі легуючих елементів або стані поверхні можуть

суттєво змінити коефіцієнт поглинання, що призводить до різних результатів термообробки. Уніфіковані бази даних дозволили б точно налаштовувати параметри лазера під конкретні матеріали, зменшити ризик помилок і сприяти поширенню моделювання як інструменту для прогнозування результатів. Відсутність такої інформації унеможливорює точне прогнозування ефекту обробки, що знижує ефективність застосування лазерних технологій у промислових умовах.

Таким чином, сучасний стан досліджень у галузі лазерного гартування вказує на наявність низки невирішених питань. Виявлення цих наукових прогалин обґрунтовує актуальність подальшого вивчення впливу довжини хвилі лазерного випромінювання на ефективність гартування сталей у різних умовах.

Одним із критично важливих технологічних параметрів процесу лазерного гартування є швидкість сканування лазерного променя. Цей параметр безпосередньо впливає на кількість теплової енергії, що передається поверхні матеріалу, і, як наслідок, визначає глибину та однорідність загартованого шару, а також формування мікроструктури сталі.

Результати експериментів [5] виявили чітку залежність між швидкістю сканування та характеристиками обробленого шару. При низьких швидкостях (від 1 мм/с до 2 мм/с) спостерігалось глибоке проникнення тепла, що забезпечувало утворення загартованого шару товщиною до 0,8 мм. Мікроструктура в цих умовах характеризувалася однорідною мартенситною фазою дрібнозернистої морфології, що зумовлювало зростання мікротвердості до 850 HV. У разі підвищення швидкості сканування від 6 мм/с до 8 мм/с товщина гартованого шару зменшувалася до 0,3–0,5 мм, а мікротвердість знижувалася на 150–200 HV. На цьому етапі також спостерігалось формування неоднорідної структури із зональною наявністю бейніту.

Ці результати підтверджують, що оптимальна швидкість сканування для сталі H11 повинна становити від 1 мм/с до 4 мм/с – саме цей діапазон забезпечує стабільне формування мартенситу без небажаних фазових

переходів та структурних дефектів. Зі збільшенням швидкості знижується ефективність обробки через зменшення часу дії теплового імпульсу, що не дозволяє досягнути необхідної температури аустенітизації у більш глибоких шарах матеріалу (рис. 1.4).

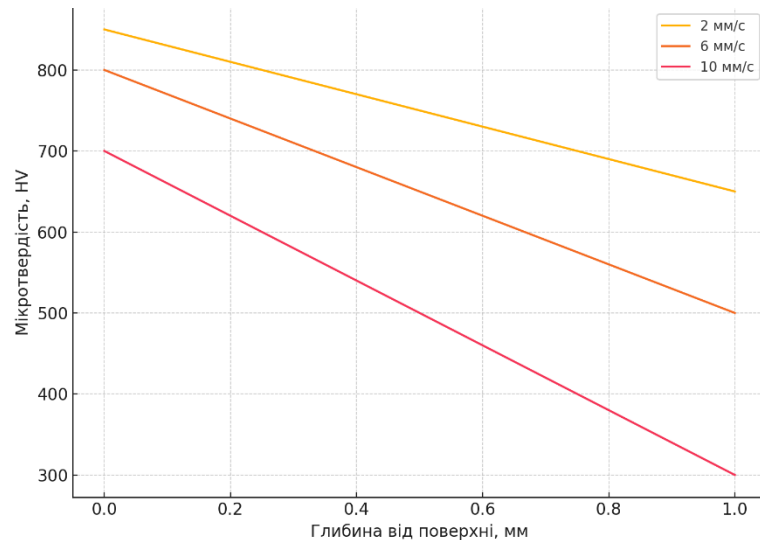


Рисунок 1.4 – Залежність мікротвердості сталі H11 від глибини при різних швидкостях сканування

Таким чином, контроль швидкості сканування є необхідною умовою для забезпечення високої якості загартованої поверхні сталі. Недотримання оптимальних параметрів призводить до формування неоднорідної структури, зниження твердості та потенційної втрати експлуатаційних властивостей компонентів.

1.4 Узагальнення сучасного стану лазерного гартування: огляд ключових тенденцій і практик

Лазерне гартування, як ефективна технологія зміцнення сталей, за останнє десятиліття стало об'єктом численних наукових і прикладних досліджень. У роботі [6] представлено ґрунтовний огляд розвитку цієї

технології, зокрема розглянуто еволюцію лазерних джерел, параметрів обробки та способів моделювання фізичних процесів.

Однією з основних тенденцій є зростаюча роль волоконних лазерів у промислових застосуваннях. Завдяки високому коефіцієнту конверсії електроенергії, стабільності променя та можливості роботи в імпульсному режимі, вони дедалі частіше замінюють традиційні CO₂- та Nd:YAG-лазери. Крім того, інженери активно досліджують нові довжини хвиль, зокрема в короткохвильовому діапазоні, для покращення ефективності поглинання енергії сталями з різним хімічним складом.

Важливою темою досліджень є взаємозв'язок технологічних параметрів, таких як швидкість сканування, потужність та діаметр променя, із результатами термічної обробки. Встановлено, що оптимальний баланс між цими параметрами дозволяє формувати загартовані шари з високою мікротвердістю та мінімальними залишковими напруженнями. Особливу увагу приділено контролю мікроструктурних перетворень – зокрема формуванню дрібнозернистого мартенситу, який забезпечує підвищену зносостійкість обробленої поверхні.

Не менш актуальним напрямом є розробка чисельних моделей, що відображають розподіл температури, фазові перетворення та напружено-деформований стан під час лазерного гартування. Такі моделі допомагають прогнозувати результати обробки без необхідності дорогих експериментів, що є особливо цінним для виробництва відповідальних деталей [6].

1.5 Постановка задачі дослідження

Сучасні технології лазерної обробки відіграють ключову роль у сфері зміцнення сталевих поверхонь, однак аналіз наукової літератури демонструє, що існує низка аспектів, які потребують додаткового вивчення. Одним із таких аспектів є вплив довжини хвилі лазерного випромінювання на ефективність гартування сталей. Попри наявність великої кількості досліджень, переважна

більшість з них присвячена випробуванню лише одного типу лазерного джерела. Такий підхід не дозволяє створити повну картину впливу спектральних характеристик випромінювання на мікроструктуру та механічні властивості оброблюваних сталей.

Проведений аналіз показав, що довжина хвилі є критичним параметром, який визначає глибину проникнення енергії в матеріал, коефіцієнт її поглинання, швидкість нагрівання, а отже – і фазові перетворення, що відбуваються в поверхневому шарі. Наприклад, використання Nd:YAG-лазера (довжина хвилі 1,064 мкм) дозволяє досягти рівноваги між поглинанням та глибиною дії, тоді як CO₂-лазери (10,6 мкм) часто демонструють меншу ефективність через нижчий коефіцієнт поглинання при однаковій потужності випромінювання. У свою чергу, зелений або ультрафіолетовий діапазони, хоч і мають вищу поглинальну здатність, забезпечують меншу глибину обробки та потребують точнішого контролю параметрів для уникнення дефектів.

Для досягнення цієї мети у роботі ставляться такі задачі:

- провести огляд сучасних методів лазерного гартування, з особливим акцентом на джерела випромінювання з різною довжиною хвилі;
- проаналізувати переваги та недоліки Nd:YAG-, CO₂- та волоконних лазерів в умовах однакових технологічних параметрів;
- сформулювати рекомендації щодо вибору типу лазера для певних марок сталі з урахуванням цільових характеристик зміцненого шару.

Таким чином, постановка задачі дослідження є результатом логічного осмислення теоретичних та практичних аспектів технології лазерного гартування та дозволяє перейти до розробки експериментальної частини, яка стане основою наступного розділу кваліфікаційної роботи.

2 АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ ХВИЛІ ЛАЗЕРНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНОГО ГАРТУВАННЯ СТАЛЕЙ

2.1 Роль лазерного гартування у підвищенні експлуатаційних характеристик сталевих виробів

Лазерне гартування являє собою високотехнологічний процес термічної обробки, що ґрунтується на використанні сфокусованого пучка лазерного випромінювання для інтенсивного та швидкого нагрівання поверхневого шару сталевий деталі до температур, що ініціюють фазові перетворення. Подальше швидке самоохолодження, зумовлене теплопровідністю основного металу, призводить до формування твердого та зносостійкого поверхневого шару при збереженні пластичності внутрішньої структури виробу [7].

Така комбінація властивостей є надзвичайно цінною для деталей, що експлуатуються в умовах значних механічних навантажень, ударних впливів або циклічних деформацій. Застосування лазерного гартування демонструє значне поліпшення ключових експлуатаційних характеристик сталевих виробів, включаючи підвищення твердості, опору зношуванню, контактної міцності та стійкості до втоми металу [8].

При падінні пучка лазерного випромінювання на поверхню матеріалу частина випромінювання відбивається від неї, а частина проходить углиб матеріалу, поглинаючись у ньому. Інтенсивність поглиненого випромінювання на глибині z оброблюваного матеріалу визначається законом Бугера-Ламберта. З урахуванням відбиття від поверхні вона дорівнює:

$$I(z) = I_0 \cdot A \exp(-az) \quad (2.1)$$

де I_0 – інтенсивність випромінювання лежить на поверхні;

a – коефіцієнт поглинання;

$A = 1 - R$ – поглинальна здатність матеріалу;

R – коефіцієнт відбиття.

Схематично процес взаємодії лазерного випромінювання з речовиною можна так: поглинання світла; передача енергії тепловим коливанням ґрат твердого тіла; нагрівання матеріалу; плавлення, руйнування матеріалу шляхом випаровування та викиду розплаву та охолодження після закінчення світлового впливу (рис. 2.1).

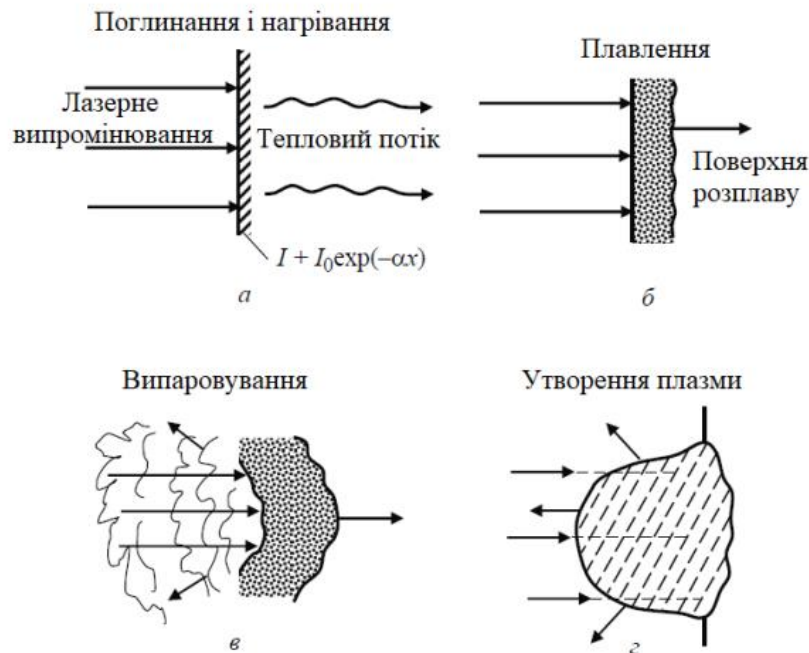


Рисунок 2.1 – Основні фізичні процеси, що виникають при взаємодії потужного лазерного випромінювання з речовиною [7]

В основі лазерного гартування сталей лежить складний комплекс фізичних явищ, що супроводжують взаємодію концентрованого пучка лазерного випромінювання з металевою поверхнею. Розуміння цих фундаментальних процесів є критично важливим для ефективного управління технологією та досягнення бажаних результатів обробки.

Першим етапом цієї взаємодії є поглинання енергії лазерного випромінювання матеріалом. Ефективність цього процесу визначається цілою низкою факторів, серед яких ключову роль відіграють довжина хвилі лазерного

випромінювання, оптичні властивості металу (коефіцієнт відбиття, поглинання), температура поверхні та її стан, включаючи шорсткість та наявність оксидних плівок [9].

Поглинена енергія трансформується в теплову, що ініціює нагрівання поверхневого шару металу. Швидкість та інтенсивність нагрівання безпосередньо залежать від потужності лазерного випромінювання та тривалості його впливу. Досягнення певних температурних рівнів призводить до фазових перетворень у структурі сталі, зокрема до аустенітизації, коли відбувається перетворення в аустеніт.

При подальшому збільшенні інтенсивності лазерного випромінювання можуть спостерігатися процеси плавлення та випаровування матеріалу. Однак, у технології лазерного гартування ці явища, як правило, є небажаними, оскільки вони можуть негативно вплинути на якість обробленої поверхні.

Крім того, взаємодія лазерного випромінювання з металом може супроводжуватися утворенням плазми над поверхнею. Плазма, в свою чергу, може впливати на процес передачі енергії в матеріал, поглинаючи або розсіюючи лазерне випромінювання [9].

Глибоке розуміння цих фізичних принципів є наріжним каменем для оптимізації процесу лазерного гартування, забезпечення контролю над мікроструктурою та досягнення необхідних експлуатаційних характеристик оброблених деталей.

У контексті сучасних методів поверхневого зміцнення сталей, лазерне гартування посідає особливе місце, вирізняючись низкою принципових переваг порівняно з традиційними технологіями, такими як об'ємне гартування з подальшим відпуском, цементація, азотування або високочастотне (ТВЧ) гартування [7]. Однією з ключових переваг лазерного гартування є його висока локальність обробки. Сфокусований лазерний промінь дозволяє здійснювати термічний вплив виключно на необхідні ділянки поверхні деталі з надзвичайно високою точністю, мінімізуючи при цьому небажаний термічний вплив на сусідні зони [7]. Ця особливість є незамінною при обробці деталей складної

геометричної форми або виробів, де зміцнення потребують лише окремі функціональні поверхні. Крім того, лазерне гартування характеризується високою швидкістю нагрівання та охолодження. Інтенсивне введення теплової енергії лазерним променем та подальше швидке відведення тепла вглиб матеріалу сприяють формуванню дрібнодисперсної мартенситної мікроструктури, яка забезпечує високі показники твердості та зносостійкості обробленої поверхні [10]. Важливою перевагою є також відсутність необхідності в контактному середовищі. Процес лазерного гартування, як правило, відбувається без прямого механічного контакту інструменту з оброблюваною деталлю, що повністю виключає ризик виникнення механічних пошкоджень поверхні. Завдяки можливості легкої автоматизації та інтеграції у виробничі лінії, лазерні системи забезпечують високу продуктивність та стабільність якості обробки, що є критично важливим для сучасного промислового виробництва. Крім того, лазерне гартування може бути економічно вигідним завдяки зменшенню витрат на ремонт та заміну деталей, а також подовженню терміну служби обладнання [7]. Не слід також забувати про екологічну чистоту процесу лазерного гартування, оскільки він не передбачає використання шкідливих хімічних реагентів або значних витрат енергії порівняно з деякими традиційними методами поверхневої обробки.

Поряд із численними перевагами, лазерне гартування має і певні обмеження, серед яких слід відзначити високу початкову вартість лазерного обладнання та необхідність залучення кваліфікованого інженерно-технічного персоналу для його ефективної експлуатації [7]. Крім того, традиційні методи поверхневого зміцнення часто супроводжуються такими недоліками, як значні деформації деталей, низька точність обробки та необхідність додаткової механічної обробки [10]. Лазерне гартування дозволяє уникнути цих проблем, забезпечуючи високу точність обробки та мінімізуючи деформації виробу. Однак, стрімкий розвиток лазерних технологій, постійне зниження вартості лазерних джерел та розширення спектра їхніх можливостей поступово нівелюють обмеження, пов'язані з вартістю обладнання, роблячи лазерне

гартування все більш доступним та економічно вигідним у багатьох промислових застосуваннях.

Ефективність процесу лазерного гартування безпосередньо залежить від цілого ряду технологічних параметрів лазерного випромінювання, серед яких довжина хвилі відіграє одну з ключових ролей. Саме довжина хвилі визначає фундаментальні механізми взаємодії лазерної енергії з поверхнею оброблюваного матеріалу, впливаючи на коефіцієнт поглинання випромінювання, глибину його проникнення в матеріал та, як наслідок, на розподіл температурного поля в зоні термічного впливу [9]. Різні типи промислових лазерів генерують випромінювання з різними довжинами хвиль, кожна з яких має свої особливості взаємодії з металевими поверхнями. Так, для термічної обробки сталей традиційно використовувалися газові CO_2 лазери, що генерують випромінювання в інфрачервоному діапазоні з довжиною хвилі 10,6 мкм [9]. Проте, сучасні твердотільні ітрій-алюмінієві гранатові (YAG) лазери, що випромінюють на довжині хвилі 1,064 мкм (також в інфрачервоному діапазоні), а також їхні гармоніки, зокрема ультрафіолетове випромінювання з довжиною хвилі 0,355 мкм, набувають все більшого поширення в технологічних процесах обробки матеріалів [9]. Важливо зазначити, що недостатньо дослідженим залишається вплив довжини хвилі при використанні імпульсних лазерів малої потужності для поверхневого гартування сталей [10].

Оптимальні параметри імпульсного лазерного гартування істотно залежать від марки сталі. Так, за даними [11], максимальна мікротвердість для сталі У12 досягається при тривалості імпульсу 40 мкс, тоді як для сталі Р6М5 характерне поступове зростання твердості зі збільшенням тривалості до 70 мкс. Це обумовлено різними теплофізичними властивостями сплавів, а також здатністю до формування мартенситу з високою дислокаційною щільністю при короткочасному нагріванні.

2.2 Мета, завдання, об'єкт і предмет дослідження

У даному дослідженні ставиться за мету всебічне вивчення впливу ключових параметрів лазерного випромінювання на ефективність процесу лазерного гартування сталей різних марок. Необхідність такого дослідження зумовлена прагненням до оптимізації існуючих технологічних режимів лазерної обробки, подальшого підвищення експлуатаційних характеристик оброблених виробів та розширення сфери практичного застосування лазерних технологій у промисловості [9].

Отримані результати стануть основою для проведення порівняльного аналізу ефективності лазерного гартування сталей з використанням лазерів різних типів, таких як CO₂, YAG та волоконні лазери, а також різних параметрів випромінювання, включаючи перспективні зараз імпульсні лазери малої потужності [12].

Об'єктом даного дослідження є процеси лазерної термічної обробки, а саме лазерного гартування сталей [7].

Предметом дослідження є вплив параметрів лазерного випромінювання, включаючи довжину хвилі, потужність та режим імпульсації, на ефективність процесу лазерного гартування сталей різних марок, з особливим акцентом на формування структури, підвищення твердості та забезпечення зносостійкості обробленої поверхні.

Як було показано у розділі 1, відбивна здатність металів зменшується із зменшенням довжини хвилі, тому ефективність нагрівання металів збільшується при використанні лазера з меншою довжиною хвилі. Отже, обробка металів з використанням Nd:YAG-лазера або Nd:YVO₄-лазера, що мають довжину хвилі $\lambda = 1,06$ мкм, більш ефективна порівняно з обробкою CO₂-лазером, з довжиною хвилі $\lambda = 10,6$ мкм.

На коефіцієнт відбиття значною мірою впливає шорсткість поверхні, що опромінюється.

Зі збільшенням шорсткості поверхні частка відбитого випромінювання зменшується ($R < 0,1$), тобто ефективність використання енергії збільшується.

У цій роботі лазерне загартування проводилося з використанням твердотільного Nd:YAG-лазера потужністю 5 Вт і довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 1,064$ мкм (рис. 2.2) та YVO₄-лазера з нелінійним кристалом і діодним накачуванням потужністю 5 Вт і довжиною хвилі випромінювання $\lambda = 0,355$ мкм, що працює в імпульсному режимі ($\tau = 10$ нс). Частота випромінювання 50 кГц, діаметр плями фокусування становив 75 мкм та 150 мкм.



Рисунок 2.2 – Твердотільний лазер L-Master DP

Довжина хвилі $\lambda = 0,355$ мкм забезпечується за рахунок генерації третьої гармоніки, що реалізується як каскадний процес. Частотне потроєння – це процес нелінійного перетворення частоти, де одержувана оптична частота втричі перевищує частоту вхідного лазерного променя. Пучок світла першої гармоніки з довжиною хвилі $\lambda = 1,064$ мкм прямує на нелінійний кристал, в якому відбувається генерація другої гармоніки з метою подвоєння частоти вихідного випромінювання до довжини хвилі $\lambda = 532$ нм (відповідної зеленої

області спектру) шляхом включення в схему нелінійного кристала лити. Кристали літєвого триборату фізично і хімічно інертні, мають високу нелінійно-оптичну ефективність. Ці нелінійні кристали найчастіше використовуються для подвоєння частоти випромінювання твердотільних лазерів. Після генерації другої гармоніки відбувається генерація третьої гармоніки шляхом додавання двох частот у другому нелінійному кристалі.

Дослідження проводилися на конструкційній сталі 45 та інструментальних сталях У12 та Р6М5. Зразки сталей піддавалися попередній термічній обробці, характерній для даної марки сталі – гартуванню з охолодженням у воді та високому відпуску при температурі 600 °С для сталі 45 (поліпшення), гартуванню та низькому відпуску при 200 °С для сталі У12 і гартуванню з трикратним високим відпуском для сталі Р6М5. Лазерне гартування УФ-випромінюванням проводили також на зразках інструментальних сталей У12 та Р6М5 у відпаленому стані. З метою збільшення поглинання випромінювання поверхнею зразки після відпуску не полірувалися.

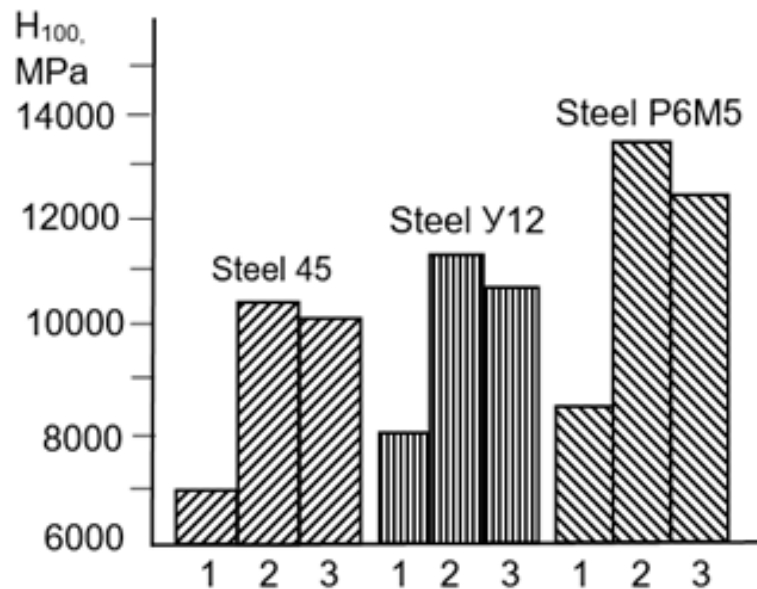
Контроль зміцненого шару проводили мікротвердістю, яку вимірювали на приладі ПМТ-3 шляхом вдавлювання стандартної чотиригранної алмазної піраміди з навантаженням 100 г.

Швидкість сканування лазерного променя по поверхні становила від 1 мм/с до 2 мм/с. Така схема обробки забезпечувала отримання суцільної обробленої доріжки з частковим перекриттям плям у ній (так званий «квазінеперервний» режим).

Завершальним етапом дослідження стане розробка практичних рекомендацій щодо вибору оптимальних параметрів лазерного випромінювання, зокрема довжини хвилі, для лазерного гартування конкретних марок сталей та технологічних умов експлуатації виробів. Розроблені рекомендації матимуть на меті забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик оброблених деталей, таких як підвищена зносостійкість, міцність та довговічність.

2.3 Результати досліджень

Досліджувалися такі режими: об'ємне загартування з охолодженням у воді (1), загартування променем YVO_4 -лазера з $\lambda = 1,06$ мкм (2) і загартування променем YVO_4 -лазера з $\lambda = 0,355$ мкм (3). Результати досліджень наведено на рисунку 2.3.



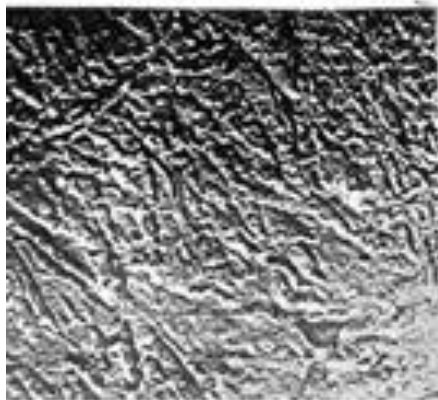
1 – об'ємне гартування; 2 – лазерне гартування з оплавленням;
3 – лазерне гартування УФ-випромінюванням.

Рисунок 2.3 – Мікротвердість сталей після різних видів гартування

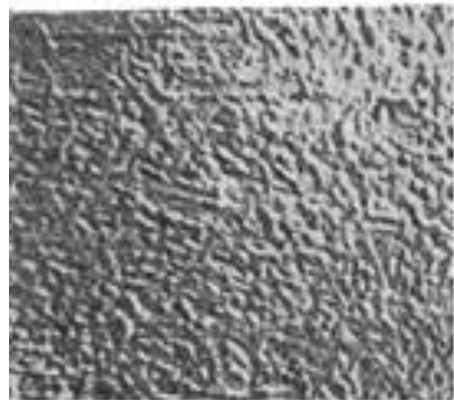
Мікротвердість зразків усіх досліджуваних сталей після гартування УФ-випромінюванням нижче, ніж з рідкого стану, проте набагато вище, ніж після об'ємної термічної обробки. Це свідчить про ефективність лазерного гартування УФ-випромінюванням.

Дослідження мікроструктури зразків стали У12 за допомогою електронного мікроскопа, що просвічує, показало, що мартенсит, що утворюється при гартуванні УФ-випромінюванням, більш дисперсний (рис.

2.4). Можна припустити, що вдосконалення режимів такої обробки може призвести до отримання наноструктур із поверхневим розміром до 100 нм.



а)



б)

а) лазерне гартування з оплавленням; б) лазерне гартування.

Рисунок 2.4 – Мікроструктура зразків після лазерного гартування, 10000
УФ-випромінюванням без оплавлення

У роботі також проводилися дослідження впливу вихідної термічної обробки на характеристики загартованого шару. Лазерному гартуванню можна піддавати попередньо необроблені деталі, зміцнюючи окремі ділянки. Можна використовувати лазерну обробку для додаткового зміцнення готових виробів. Раніше було показано [9, 10, 11], що мікротвердість загартованого шару впливають як тривалість імпульсу, і вихідна структура. Для з'ясування впливу вихідної обробки лазерне загартування проводили за постійної тривалості імпульсу.

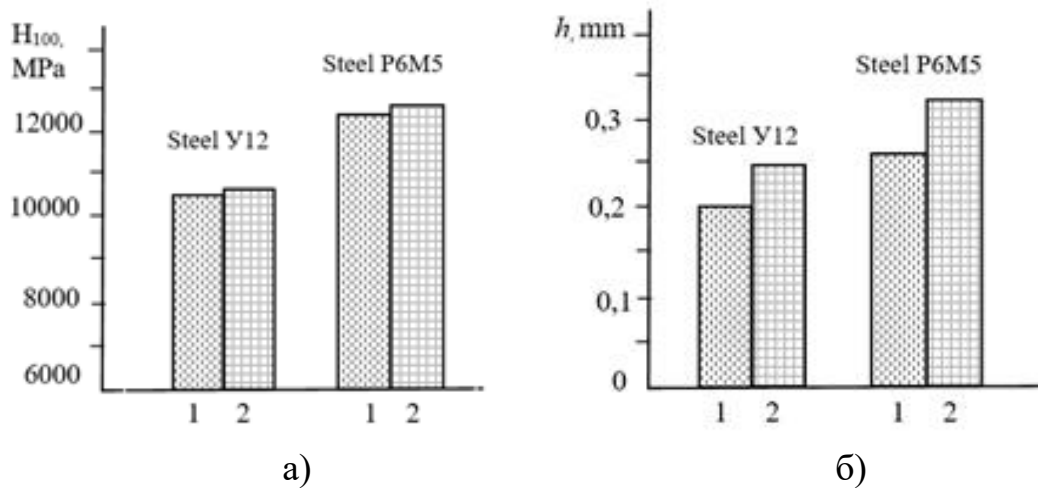
Вимірювання мікротвердості H_{100} загартованих шарів досліджуваних сталей показало, що глибина зміцненого шару при лазерному гартуванні УФ-випромінюванням значною мірою залежить від вихідної структури і мікроструктури сталі. З метою з'ясування впливу вихідної структури на характеристики загартованого шару лазерну обробку УФ-випромінюванням також проводили на зразках інструментальних сталей (У12, Р6М5) у

відпаленому та загартованому станах. Мікроструктура вуглецевої інструментальної сталі У12 у відпаленому стані є дисперсною сумішшю перліту і цементиту (карбіду заліза Fe_3C), а швидкорізальної Р6М5 – сумішшю ледебуриту та карбідів легуючих елементів. У загартованому стані ці сталі завжди мають мартенситну структуру із залишковим аустенітом. Мікротвердість та глибина загартованого шару зразків кожної досліджуваної сталі, як відпалених, так і загартованих, вимірювалася після лазерного гартування.

Було встановлено, що на твердість загартованого шару вид попередньої термічної обробки помітно впливає лише при гартуванні з оплавленням. При цьому у разі попереднього гартування глибина загартованого шару збільшується на 20–25 % (рис. 2.5). За нашими припущеннями найбільш вірогідним є пояснення різниці відмінністю теплопровідності перліто-карбідних структур та мартенситу.

Як відомо, гартування полягає у нагріванні сталі вище температур фазових перетворень, певній витримці при цій температурі та швидкому (у воді або маслі) охолодженні для запобігання дифузійним перетворенням. В результаті такого нагрівання та витримки відбувається розчинення карбідів, а при дуже швидкому охолодженні утворюється мартенсит – пересичений твердий розчин вуглецю в α -залізі.

У випадку лазерного загартування відсутня витримка. Завдяки високошвидкісному нагріванню створюється можливість отримання дрібнодисперсної структури з великою щільністю дислокацій, вищих значень твердості, міцності та в'язкості порівняно з іншими видами зміцнювальних обробок.



1 – відпал; 2 – об'ємне зміцнення.

Рисунок 2.5 – Вплив первинної термообробки на мікротвердість (а) та глибину зміцненого шару (б) сталі Y12 та P6M5 після лазерного зміцнення УФ-випромінюванням

Характеристики загартованого шару в першу чергу залежать при цьому від теплофізичних властивостей матеріалу, в нашому випадку сталі. Мартенсит має меншу теплопровідність та теплоємність, ніж ледебуритні та перліто-карбідні структури досліджуваних відпалених сталей.

Це звичайно призводить до того, що лазерне випромінювання при однаковому енергетичному впливі забезпечує для попередньо загартованих сталевих зразків нагрівання більш глибоких шарів. При обробці сталі у стані відпалу (перліто-карбідна структура) енергія випромінювання за рахунок більшої теплопровідності розсіюється углиб матеріалу.

Лазерну обробку досліджуваних сталей для отримання більш глибокого зміцненого шару доцільно проводити на готових деталях, що пройшли об'ємне гартування та відпуск. Така обробка допоможе отримати структуру із дещо меншою теплопровідністю. До того ж така обробка забезпечить більш високу зносостійкість оброблених деталей. У зв'язку з низькою продуктивністю такий процес не можна рекомендувати для зміцнення поверхонь великих деталей.

Однак таке зміцнення можна рекомендувати, наприклад, для вимірювального та ріжучого інструменту. Із усіх сучасних способів зміцнення лазерне загартування є більш економічним, стабільним і найбільш застосовним для такого інструменту, з урахуванням його специфіки.

Важливо зазначити, що на процес лазерного гартування впливають не лише параметри лазерного випромінювання, але й параметри оброблюваного матеріалу, такі як марка сталі та її теплофізичні властивості, включаючи теплопровідність та теплоємність.

Імпульсні режими лазерної обробки мають важливе значення в технологіях термічного зміцнення завдяки можливості концентрувати значну кількість енергії в обмеженій зоні за короткий час. У роботі [11] встановлено, що використання багатоімпульсного режиму з тривалістю імпульсу від 30 мкс до 70 мкс при середній потужності лазера 5 Вт дозволяє досягти високої ефективності зміцнення без надмірного термічного впливу на матеріал. Це забезпечує збереження геометричних параметрів поверхні та підвищення твердості без виникнення оплавлених зон.

Лазерне гартування є універсальною технологією, яку можна застосовувати до широкого спектра марок сталей. Однак, ефективність процесу та досягнуті експлуатаційні характеристики оброблених деталей значною мірою залежать від хімічного складу та початкової мікроструктури матеріалу.

Різні марки сталей характеризуються різними коефіцієнтами поглинання лазерного випромінювання. Це означає, що кількість енергії, яка передається від лазерного променя до матеріалу, буде різною для різних сталей. Наприклад, деякі леговані сталі можуть демонструвати вищий коефіцієнт поглинання для певних довжин хвиль лазерного випромінювання порівняно з вуглецевими сталями [9].

Теплофізичні властивості сталі, такі як теплопровідність та теплоємність, також відіграють важливу роль у процесі лазерного гартування. Теплопровідність визначає швидкість передачі тепла вглиб матеріалу, а

теплоємність - кількість тепла, необхідну для нагрівання матеріалу до певної температури. Ці властивості впливають на розподіл тепла в зоні обробки та швидкість охолодження, що, в свою чергу, визначає фазові перетворення та кінцеву мікроструктуру загартованого шару [8].

Початкова мікроструктура сталі, включаючи розмір зерна, наявність перліту або фериту, також впливає на процес аустенізації та формування мартенситу при лазерному гартуванні.

Таким чином, при розробці режимів лазерного гартування для конкретної марки сталі необхідно враховувати всі ці особливості матеріалу для досягнення оптимальних результатів обробки.

Довжина хвилі лазерного випромінювання є одним з найважливіших параметрів, що визначають ефективність процесу лазерного гартування сталей. Вона впливає на ряд ключових аспектів взаємодії лазерного випромінювання з матеріалом, включаючи поглинання енергії, розподіл тепла, кінетику нагрівання та охолодження, формування мікроструктури та механічні властивості обробленої поверхні.

Коефіцієнт поглинання лазерного випромінювання металами залежить від довжини хвилі. Різні метали та сплави мають різні спектральні характеристики поглинання. Як правило, для більшості металів коефіцієнт поглинання збільшується зі зменшенням довжини хвилі [9]. Це означає, що лазерне випромінювання з коротшою довжиною хвилі (наприклад, видиме або ультрафіолетове) краще поглинається металами, ніж випромінювання з більшою довжиною хвилі (наприклад, інфрачервоне). Ефективне поглинання енергії є критично важливим для забезпечення ефективного нагрівання поверхні та досягнення необхідних температур для фазових перетворень.

Довжина хвилі лазерного випромінювання також впливає на глибину проникнення лазерної енергії в метал. Випромінювання з коротшою довжиною хвилі, як правило, поглинається у більш тонкому поверхневому шарі, що призводить до швидкого нагрівання поверхні та високих температурних градієнтів. Випромінювання з більшою довжиною хвилі проникає глибше в

матеріал, забезпечуючи більш об'ємний розподіл тепла. Це може бути корисним для отримання більшої глибини загартованого шару, але може також призводити до більшого нагрівання деталі в цілому.

Швидкість нагрівання та охолодження поверхні металу при лазерному гартуванні значною мірою залежить від довжини хвилі лазерного випромінювання. Коротші довжини хвилі, що забезпечують більш ефективне поглинання та поверхневий розподіл тепла, призводять до швидшого нагрівання та охолодження. Це може впливати на кінетику фазових перетворень та мікроструктуру загартованого шару.

Довжина хвилі лазерного випромінювання може впливати на розмір зерна, розподіл фаз та напружений стан у загартованому шарі. Швидке нагрівання та охолодження, характерні для коротших довжин хвиль, можуть сприяти утворенню дрібнозернистої мартенситної структури, що забезпечує високу твердість та міцність. Повільніше нагрівання та охолодження, пов'язані з більшими довжинами хвиль, можуть призводити до утворення більш грубозернистої структури.

Вплив довжини хвилі на мікроструктуру загартованого шару, в свою чергу, визначає механічні властивості обробленої поверхні, такі як твердість, зносостійкість, міцність на втому та корозійна стійкість.

ВИСНОВКИ

У ході виконання кваліфікаційної роботи було досліджено процес лазерного гартування як ефективний метод термічного зміцнення сталей з урахуванням сучасних підходів до вибору параметрів лазерного випромінювання. Проаналізовано вплив технологічних параметрів, зокрема довжини хвилі, потужності та швидкості сканування лазера, на формування мікроструктури та зміну механічних властивостей сталі. Встановлено, що вибір довжини хвилі лазерного випромінювання істотно впливає на глибину термічного впливу, рівномірність нагрівання та утворення мартенситної структури без утворення тріщин і дефектів.

На основі вивчених джерел та узагальнення результатів експериментальних досліджень підтверджено, що застосування лазерів із різною довжиною хвилі дозволяє гнучко керувати процесом гартування, забезпечуючи як поверхнєве зміцнення, так і глибоке проникнення теплової енергії при відповідних умовах. Зокрема, короткохвильові джерела (532 нм) демонструють високу точність і стабільність, що робить їх доцільними для зміцнення тонкостінних елементів, тоді як лазери з довшими хвилями забезпечують глибше гартування без перегріву поверхні.

Таким чином, лазерне гартування підтвердило свою ефективність як високоточна та керована технологія, що дозволяє досягати значного покращення експлуатаційних характеристик сталі без необхідності в масштабних термічних обробках. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації режимів лазерної обробки у промислових умовах, а також для подальших наукових досліджень у галузі матеріалознавства та лазерних технологій.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Recent advances in laser surface hardening: techniques and modeling [Electronic resource] // Materials. MDPI, 2020. Vol. 13. No 4. Access mode: URL:<https://www.mdpi.com> (дата звернення 11.05.2025).
2. Laser surface transformation hardening for automotive metals [Electronic resource] // Materials. MDPI, 2021. Vol. 14, No 1. Access mode: URL:<https://www.mdpi.com> (дата звернення 11.05.2025).
3. Діаграма стану залізо–вуглець: навчальний посібник / НМетАУ, КПІ, ХНУРЕ. Київ: Техніка, 2018. 89 с.
4. Zhang Y., Li J., Chen H. Hardening efficiency and microstructural changes during laser surface hardening // Materials. MDPI. 2021. Vol. 14, No 7. P. 1655.
5. Naqiuddin M., Ishak M., Aiman M.H., Quazi M.M. The effect of laser surface hardening on the surface hardness of mild steel // Materials. 2020. Vol. 13, No 12. P. 2738.
6. Study on the quenching depth and surface hardness of metal under laser treatment // Frontiers in Physics. 2020. ol. 8. Access mode: <https://www.frontiersin.org> (дата звернення 13.05.2025).
7. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Федоренко, Є. П. Лазерна поверхнева обробка матеріалів: монографія . Харків : ФОП Панов А. М., 2020. 100 с.
8. Дробот О. С., Підгайчук С. Я., Чорнобровий, В. А. Розробка технології лазерного гартування для зміцнення корінних шийок колінчатого валу: кваліфікаційна робота. Полтава: ЦФЕНД, 2022. 87 с.
9. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Попова О. Г. Нові технології лазерної поверхневої обробки // Авіаційно-космічна техніка і технологія. 2021. № 2. С. 59–64.
10. Афанасьєва О. В., Лалазаров, Н. О. Технологічне застосування лазерів малої потужності 1st International Conference on Optimization of

Teaching and Learning in a Covid-19 Era. heffield, UK, 2020. С. 7–9.

11. Афанасьєва О. В. Вплив режимів лазерного гартування на формування мікроструктури та механічних властивостей сталі [Електронний ресурс] // Збірник наукових праць Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. 2018. С. 45–50.

12. Афанасьєва О. В., Лалазарова Н. О., Комарова Г. Л. Особливості поверхневого гартування сталей імпульсними лазерами малої потужності // Інженерія поверхні та реновація виробів: матеріали 24-ї Міжнародної науково-технічної конференції. Київ, 26–27 червня 2024 р. Київ: АТМ України, 2024. С. 2–6.