МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Факультет будівництва, архітектури та дизайну
(повне найменування факультету)

Кафедра композиційних матеріалів, хімії та технологій
(повне найменування кафедри)

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)
бакалавра
(ступінь вищої освіти)

Оптимізація режимів термічної обробки середньовуглецевих низьколегованих сталей
(назва теми)

Виконав: студент 4 курсу, групи БАД-212

Спеціальності 132 – «Матеріалознавство»
(код і найменування спеціальності)

Освітня програма (спеціалізація):
«Композиційні та порошкові матеріали, покриття»
Нікітюк І.В.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Керівник Мітяєв О.А.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

Рецензент Капустян О.Є.
(ПРІЗВИЩЕ та ініціали)

2026

Національний університет «Запорізька політехніка»
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інститут, факультет Будівництва, архітектури та дизайн
Кафедра Композиційних матеріалів, хімії та технологій
Ступінь вищої освіти (освітній ступінь) бакалаврат
Спеціальність 132 Матеріалознавство
(код і назва)
освітня програма (спеціалізація) Композиційні та порошкові матеріали, покриття
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри КМХТ
_____ (Іван АКІМОВ)
«20» квітня 2026 року

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Нікітюк Ігор Вікторович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Оптимізація режимів термічної обробки середньо-вуглецевих низьколегованих сталей.
Керівник проекту (роботи) Мітяєв Олександр Анатолійович д.т.н., професор
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від «17» 04 2026 р., № 173
2. Строк подання студентом проекту(роботи) 20.05.2026р.
3. Вихідні дані до проекту (роботи) Боровмісні низьколеговані сталі, що потребують підвищення механічних та службових властивостей методами оптимізації технології термічного оброблення

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Області застосування та умови роботи боровмісних низьколегованих сталей та виробів з них. Різновиди марок модифікованих бором сталей, методи підвищення їх механічних та експлуатаційних властивостей. Різновиди технологій термічного оброблення боровмісних низьколегованих сталей. Технологічні рекомендації щодо покращення мікроструктури та експлуатаційних властивостей сталі 30MnB5 за рахунок оптимізації режимів гартування та подальшого відпуску.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Області застосування та умови роботи боровмісних низьколегованих сталей та виробів з них. Переваги модифікування сталей бором. Механізмі впливу

після гартування із подальшим відпусканням. Результати механічних випробувань. Висновки. Всього 13 слайдів.

6. Консультанти розділів проєкту (роботи)

Розділ	ПРІЗВИЩЕ, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	прийняв виконане завдання
1	Олександр МІТЯЄВ, професор	20.04.2026	28.04.2026
2	Олександр МІТЯЄВ, професор	28.04.2026	05.05.2026
3	Олександр МІТЯЄВ, професор	05.05.2026	15.05.2026
Нормо-контроль	Юлія ПЕТРУША, доцент	05.05.2026	18.05.2026

7. Дата видачі завдання «20» квітня 2026 року.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№№ п.п.	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вступ, розділ 1	28.04.2026	виконано
2.	Розділ 2	05.05.2026	виконано
3.	Розділ 3	15.05.2026	виконано
4.	Попередній захист	22.05.2026	виконано

Студент _____ Ігор НІКІТЮК
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Керівник проекту (роботи) _____ Олександр МІТЯЄВ
(підпис) (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до дипломної кваліфікаційної роботи бакалавра: 31 с., 3 табл., 4 рис., 8 джерел.

ДОЕВТЕКТОЇДНА СТАЛЬ, ТЕРМІЧНА ОБРОБКА, МІКРОСТРУКТУРА, МАРТЕНСИТ, АУСТЕНІТ, МІЦНІСТЬ, УДАРНА В'ЯЗКІСТЬ, ТВЕРДІСТЬ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ.

Мета роботи: оптимізація режимів термічної обробки, що забезпечують покращення механічних характеристик сталі 30MnB5 в умовах лабораторних випробувань та промислового виробництва. Методи дослідження: аналіз літературних та виробничих даних, механічні випробування (розтягування, ударна в'язкість, твердість), металографічні дослідження, термічна обробка (гартування, відпуск), визначення мікроструктури гарячекатаного прокату.

Результати роботи: встановлено ефективні режими термічної обробки, що дозволяють отримати оптимальний комплекс твердості, міцності та ударної в'язкості сталі 30MnB5. Рекомендовані параметри можуть бути використані в умовах ПАТ «Запоріжсталь» для підвищення експлуатаційної надійності готових виробів. Практичне значення: результати роботи можуть бути впроваджені у виробництво гарячекатаного прокату та деталей із підвищеною зносостійкістю, що працюють під дією ударних і абразивних навантажень. Оптимізація технологічних параметрів сприяє розширенню номенклатури продукції та підвищенню економічної ефективності підприємства. Стислі висновки: отримані вдосконалені режими термічної обробки сталі 30MnB5 дозволяють забезпечити покращений комплекс механічних характеристик, що робить цю марку більш конкурентоспроможною та економічно вигідною у промисловому виробництві.

ЗМІСТ

Вступ……..……...6

1. Структура та властивості середньовуглецевих сталей…….…..7

1.1 Боровмісні низьколеговані сталі: властивості та переваги 7

1.2 Сталь 30MnB5: призначення, склад і вимоги стандартів 8

1.3 Вплив бору на структуру та властивості конструкційних сталей 10

1.4 Значення термічної обробки у формуванні властивостей сталей..... 11

1.5 Висновки за результатами літературного огляду 13

2. Матеріали та методи дослідження…….….15

2.1 Матеріали, що використовувалися у роботі..... 15

2.2 Методики термічної обробки сталі 30MnB5 16

2.3 Методи визначення механічних властивостей 19

2.4 Методи дослідження мікроструктури..... 20

3. Результати досліджень та їх аналіз……..22

3.1 Вплив режимів загартування та відпуску на механічні властивості сталі 30MnB5 22

3.2 Аналіз отриманих мікроструктур..... 24

3.3 Порівняльна оцінка ефективності експериментальних режимів термічної обробки 27

Висновки……..……..29

Перелік використаних джерел…….……31

ВСТУП

Сучасні металургійні підприємства України та світу працюють в умовах високої конкуренції, постійної зміни ринкових потреб та вимог до якості продукції. Для збереження позицій на міжнародному та внутрішньому ринках виробники металопродукції мають забезпечувати випуск матеріалів, що відповідають жорстким вимогам європейських і світових стандартів, а також демонструють стабільні експлуатаційні характеристики в реальних умовах роботи. У 2022 році ПАТ «Запоріжсталь» розпочало освоєння виробництва нової для підприємства конструкційної низьколегованої боровмісної сталі марки 30MnB5, яка використовується для загартування та відпуску. Ця сталь призначена для виготовлення деталей і елементів машин, що працюють в умовах інтенсивних механічних і ударних навантажень. Висока зносостійкість, міцність, твердість та технологічність після термічної обробки роблять дану марку однією з перспективних для використання у важкому обладнанні та інструментальному виробництві. Формування комплексу властивостей, який одночасно забезпечує високу міцність, достатню пластичність та опір ударним навантаженням, залежить від правильно обраних параметрів термічної обробки. Саме тому актуальним є дослідження впливу різних режимів загартування та відпуску на структуру та експлуатаційні характеристики сталі 30MnB5.

У цій кваліфікаційній роботі розглянуто етапи технологічного освоєння виробництва гарячекатаного прокату зі сталі 30MnB5 на ПАТ «Запоріжсталь», проведено аналіз структури матеріалу та виконано підбір оптимальних експериментальних режимів термічної обробки. Особливу увагу приділено визначенню таких параметрів обробки, які дозволяють досягти покращених механічних властивостей готової продукції, що підвищує її конкурентоспроможність та розширює можливості промислового застосування.

1 СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ СЕРЕДНЬОВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ

1.1 Боровмісні низьколеговані сталі: властивості та переваги

Боровмісні низьколеговані сталі належать до сучасного класу конструкційних матеріалів, які широко застосовуються у машинобудуванні, аграрній техніці та важкому промисловому обладнанні. Їх характерною особливістю є введення у хімічний склад мікродобавок бору, що суттєво впливають на формування структури та експлуатаційних властивостей сталі навіть за його надзвичайно малого вмісту [1].

Бор відноситься до ефективних мікролегуючих елементів, здатних значно підвищувати прогартовуваність сталей. На відміну від традиційних легувальних елементів, таких як хром, нікель або молібден, бор вводиться у кількостях порядку тисячних часток відсотка, однак його вплив на кінцеві властивості матеріалу є співрозмірним або навіть більш вираженим. Це робить боровмісні сталі економічно доцільними та технологічно привабливими для промислового використання.

Основним механізмом впливу бору є його здатність концентруватися на межах аустенітних зерен та гальмувати процеси утворення фериту під час охолодження. Внаслідок цього зростає частка твердих структурних складових, таких як мартенсит або бейніт, що забезпечує підвищення твердості, міцності та зносостійкості виробів після термічної обробки. При цьому досягається більш рівномірний розподіл властивостей по перерізу прокату, що є важливим для деталей, які працюють під дією ударних та змінних навантажень [2].

Боровмісні сталі у гарячекатаному стані, як правило, характеризуються достатньо високою пластичністю та доброю оброблюваністю різанням і тиском. Це дозволяє виготовляти з них заготовки складної форми без утворення тріщин і дефектів. Після проведення операцій загартування та відпуску такі сталі набувають підвищеної міцності й твердості, зберігаючи при цьому необхідний

рівень ударної в’язкості, що є критично важливим для експлуатації в умовах динамічних навантажень [3].

Широке впровадження боровмісних сталей зумовлене їх здатністю замінювати більш леговані та дорогі матеріали без зниження експлуатаційних характеристик. Застосування мікролегування бором дає змогу оптимізувати хімічний склад сталі, зменшити витрати дефіцитних легуючих елементів і водночас забезпечити високий рівень механічних властивостей готової продукції.

Таким чином, боровмісні низьколеговані сталі є перспективним матеріалом для виготовлення відповідальних деталей машин і механізмів. Поєднання високої прогартовуваності, зносостійкості та технологічності робить їх доцільними для використання у виробах, що працюють в умовах інтенсивного механічного, ударного та абразивного зношування.

1.2 Сталь 30MnB5: призначення, склад і вимоги стандартів

Сталь марки 30MnB5 належить до конструкційних низьколегованих боровмісних сталей, призначених для загартування та відпуску. Вона широко використовується для виготовлення деталей і виробів, які в процесі експлуатації зазнають значних механічних, ударних та абразивних навантажень. Завдяки поєднанню підвищеної міцності, твердості та достатньої пластичності після термічної обробки дана марка є перспективною для застосування у машинобудуванні, аграрній техніці та важкому промисловому обладнанні.

Особливістю сталі 30MnB5 є наявність у її складі марганцю та мікродобавок бору, які забезпечують підвищену прогартовуваність і формування рівномірної структури по всьому перерізу прокату. У гарячекатаному стані сталь характеризується задовільною пластичністю та доброю оброблюваністю, що спрощує виготовлення заготовок і деталей різної конфігурації. Після проведення

загартування та відпуску матеріал набуває високих показників міцності та зносостійкості, зберігаючи необхідний рівень ударної в’язкості.

Виробництво та застосування сталі 30MnB5 регламентується вимогами європейських і національних стандартів. Основним нормативним документом є стандарт EN 10083-3, гармонізований в Україні як ДСТУ EN 10083-3 [4], який встановлює вимоги до хімічного складу, механічних властивостей і режимів термічної обробки конструкційних сталей для загартування та відпуску.

Згідно з вимогами стандарту, вміст вуглецю у сталі 30MnB5 забезпечує оптимальне співвідношення між міцністю та пластичністю, а підвищений вміст марганцю сприяє стабілізації аустеніту та покращенню прогартовуваності. Мікролегування бором у строго регламентованих кількостях значно підвищує ефективність термічної обробки, не погіршуючи технологічних властивостей матеріалу.

Рекомендовані стандартом режими термічної обробки сталі 30MnB5 передбачають загартування з аустенітного стану з подальшим відпуском у середньому температурному інтервалі. Така обробка забезпечує формування мартенситної або мартенситно-бейнітної структури з оптимальним комплексом механічних характеристик. Остаточні властивості сталі значною мірою залежать від точного дотримання температур нагріву, часу витримки та умов охолодження [5, 6].

Завдяки відповідності вимогам міжнародних стандартів та стабільності властивостей після термічної обробки, сталь 30MnB5 може успішно застосовуватися як альтернатива більш легованим і дорогим сталям. Це дозволяє знизити собівартість виробництва при збереженні високої експлуатаційної надійності готових виробів [7, 8].

1.3 Вплив бору на структуру та властивості конструкційних сталей

Мікролегування конструкційних сталей бором є одним із ефективних способів підвищення їхніх механічних і експлуатаційних характеристик без суттєвого ускладнення хімічного складу. Особливістю бору як легуючого елемента є те, що він проявляє помітний вплив на структуру та властивості сталі вже за надзвичайно малих концентрацій, що відрізняє його від традиційних легувальних компонентів.

Основний ефект бору пов’язаний з його високою поверхневою активністю та здатністю концентруватися на межах аустенітних зерен. У процесі нагріву під загартування розчинений бор гальмує зародження феритної фази під час охолодження, що сприяє збереженню аустенітної структури до нижчих температур. У результаті цього зростає частка мартенситних або бейнітних складових після загартування, що забезпечує підвищення твердості, міцності та зносостійкості сталі.

Важливою особливістю впливу бору є його позитивний вплив на прогартовуваність сталі. Завдяки мікролегуванню бором досягається більш рівномірне формування твердих структурних фаз по всьому перерізу прокату, що особливо важливо для деталей середньої та великої товщини. Це дозволяє зменшити ризик утворення зон зниженої твердості та підвищити стабільність механічних властивостей готових виробів.

Ефективність дії бору значною мірою залежить від його стану у металі. Найбільший позитивний ефект спостерігається у випадку, коли бор перебуває у розчиненому стані, а не у вигляді неметалевих включень або сполук. Для цього важливе дотримання оптимального співвідношення бору з азотом і вуглецем, оскільки надлишок азоту може призводити до зв’язування бору у нітриди, що знижує його вплив на прогартовуваність.

Разом із підвищенням характеристик міцності бор сприяє збереженню достатнього рівня пластичності та ударної в’язкості конструкційних сталей. Це

пояснюється формуванням дрібнозернистої структури та стабілізацією меж зерен, що перешкоджає розвитку крихкого руйнування. Таким чином, мікролегування бором дозволяє досягти сприятливого поєднання високої міцності та здатності матеріалу поглинати енергію удару.

Водночас слід зазначити, що перевищення оптимального вмісту бору може мати негативний вплив на властивості сталі. Надмірна кількість бору здатна призводити до утворення крихких фаз і зниження пластичності, тому його концентрація повинна суворо контролюватися відповідно до вимог стандартів та технологічних інструкцій.

Отже, бор є одним із найбільш ефективних мікролегуючих елементів для конструкційних сталей, зокрема для сталей типу 30MnB5. Його застосування дозволяє істотно підвищити прогартовуваність, міцність і зносостійкість матеріалу, зберігаючи при цьому необхідний рівень пластичних властивостей, що є вирішальним для деталей, які працюють в умовах інтенсивних механічних та ударних навантажень.

1.4 Значення термічної обробки у формуванні властивостей сталей

Термічна обробка є одним із ключових технологічних процесів, що визначають комплекс механічних і експлуатаційних властивостей конструкційних сталей. Саме завдяки раціональному вибору режимів нагріву, витримки та охолодження можливе цілеспрямоване формування мікроструктури матеріалу, яка забезпечує необхідне поєднання міцності, твердості, пластичності та ударної в’язкості.

Для середньовуглецевих низьколегованих сталей термічна обробка відіграє вирішальну роль у реалізації потенціалу легування. У гарячекатаному або нормалізованому стані такі сталі, як правило, не забезпечують достатнього рівня міцності та зносостійкості для роботи в умовах інтенсивних навантажень.

Проведення загартування з аустенітного стану з подальшим відпуском дозволяє істотно підвищити їхні механічні характеристики та стабілізувати структуру [5, 6].

Загартування спрямоване на отримання пересичених твердих фаз, насамперед мартенситу, що характеризується високою твердістю і міцністю. При цьому швидкість охолодження та температура нагріву під загартування мають вирішальний вплив на формування структури та глибину прогартовування. Недостатня інтенсивність охолодження може призводити до утворення феритно-перлітних ділянок і зниження експлуатаційних властивостей, тоді як надмірно жорсткі режими можуть спричиняти підвищену крихкість і внутрішні напруження.

Відпуск є обов’язковим етапом термічної обробки загартованих сталей, оскільки дозволяє знизити рівень внутрішніх напружень та скоригувати співвідношення між міцністю і пластичністю. Залежно від температури та тривалості відпуску можливе регулювання структури мартенситу, виділення карбідних фаз і формування оптимального комплексу механічних властивостей. Для сталей, що працюють під дією ударних навантажень, особливе значення має середньотемпературний відпуск, який забезпечує достатню ударну в’язкість при збереженні високої міцності.

Для боровмісних сталей, зокрема сталі марки 30MnB5, ефективність термічної обробки значно підвищується завдяки мікролегуванню бором. Бор сприяє підвищенню прогартовуваності, що дозволяє отримувати однорідну структуру навіть у прокаті більшої товщини. Це розширює технологічні можливості застосування таких сталей і підвищує надійність готових виробів [5, 6].

Таким чином, термічна обробка є основним інструментом керування структурою і властивостями середньовуглецевих низьколегованих сталей. Раціональний вибір режимів загартування та відпуску дозволяє забезпечити оптимальний баланс міцності, зносостійкості та ударної в’язкості, що є

необхідною умовою для ефективної експлуатації виробів у складних умовах навантаження.

1.5 Висновки за результатами літературного огляду

Проведений аналіз літературних джерел і нормативної документації показав, що середньовуглецеві низьколеговані боровмісні сталі займають важливе місце серед конструкційних матеріалів, призначених для роботи в умовах підвищених механічних, ударних та абразивних навантажень. Їх широке застосування зумовлене можливістю формування високого рівня міцності та зносостійкості при збереженні достатньої пластичності та ударної в’язкості після термічної обробки.

Встановлено, що мікролегування бором є ефективним способом підвищення прогартовуваності сталей без істотного збільшення вмісту традиційних легувальних елементів. Бор сприяє стабілізації аустеніту під час охолодження, формуванню дрібнозернистої структури та збільшенню частки твердих структурних складових після загартування. Водночас ефективність його впливу значною мірою залежить від дотримання оптимального вмісту та технологічних умов виплавки і термічної обробки.

Аналіз властивостей сталі марки 30MnB5 показав, що вона є перспективним матеріалом для виготовлення відповідальних деталей машин і механізмів. Поєднання марганцю та мікродобавок бору забезпечує сталі високу прогартовуваність і стабільність властивостей по перерізу прокату, що дозволяє отримувати однорідну структуру після термічної обробки. Разом із цим кінцеві механічні характеристики значною мірою визначаються режимами загартування та відпуску.

Встановлено, що саме термічна обробка є основним фактором формування комплексу механічних властивостей середньовуглецевих низьколегованих

сталей. Раціональний вибір температур нагріву, тривалості витримки та умов охолодження дозволяє цілеспрямовано керувати структурою матеріалу і досягати необхідного балансу між міцністю, твердістю та ударною в’язкістю. Неправильний вибір режимів, навпаки, може призводити до зниження експлуатаційної надійності виробів.

На підставі проведеного огляду літературних джерел та аналізу сучасних підходів до термічної обробки боровмісних сталей можна сказати, що у даній роботі потрібно визначити ефективні режими термічної обробки сталі марки 30MnB5, які б забезпечили оптимальні механічні властивості, необхідні для експлуатації виробів в умовах інтенсивних механічних та ударних навантажень. Тому у роботі проводили:

– дослідження вихідної структури та механічні властивості гарячекатаного прокату зі сталі 30MnB5;

– аналізували вплив різних режимів загартування на формування мікроструктури та міцнісних характеристик сталі;

– виявляли вплив температури та режимів відпуску на твердість, міцність і ударну в’язкість матеріалу;

– оцінювали ефективність експериментальних режимів термічної обробки з точки зору формування оптимального комплексу властивостей;

– формулювали практичні рекомендації щодо застосування отриманих результатів у виробничих умовах.

Таким чином, результати огляду підтверджують актуальність теми дослідження та обґрунтовують доцільність проведення експериментальних робіт, спрямованих на оптимізацію режимів термічної обробки сталі марки 30MnB5.

2 МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У даному розділі наведено характеристику матеріалів, що використовувалися у процесі виконання дипломної роботи, а також описано основні методи та методики експериментальних досліджень. Обрані матеріали та методи дозволяють комплексно оцінити вплив режимів термічної обробки на структуру та механічні властивості середньовуглецевої низьколегованої боровмісної сталі марки 30MnB5.

Експериментальні дослідження спрямовані на встановлення закономірностей формування мікроструктури та механічних характеристик сталі залежно від параметрів загартування та відпуску. Для досягнення поставленої мети застосовувався комплекс механічних випробувань, металографічних досліджень і аналізу отриманих результатів, що відповідає сучасним вимогам матеріалознавчих досліджень.

2.1 Матеріали, що використовувалися у роботі

Об’єктом дослідження в даній роботі є середньовуглецева низьколегована боровмісна сталь марки 30MnB5, яка широко застосовується для виготовлення деталей машин і механізмів, що працюють в умовах підвищених механічних та ударних навантажень. Матеріалом для проведення досліджень слугував гарячекатаний прокат виробництва ПАТ «Запоріжсталь». Хімічний склад даної сталі наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сталі 30MnB5 (за ДСТУ EN 10083-3).

Елемент	C	Mn	Si	B	P	S
Вміст, %	0,27–0,33	1,10–1,40	≤0,40	0,0008–0,005	≤0,025	≤0,025

Наведений у табл. 2.1 хімічний склад, згідно з [1, 2, 6] забезпечує підвищену прогартовуваність сталі та можливість формування мартенситної структури після термічної обробки.

Зразки для експериментальних досліджень відбиралися з листового прокату у стані постачання. Хімічний склад сталі відповідав вимогам ДСТУ EN 10083-3 та забезпечував можливість проведення термічної обробки за рекомендованими режимами. Вихідний структурний стан матеріалу характеризувався типовою для гарячекатаного прокату ферито-перлітною мікроструктурою, що є придатною для подальшого дослідження впливу термічної обробки.

Для проведення механічних випробувань та металографічних досліджень з прокату виготовлялися зразки встановлених розмірів і форми відповідно до вимог чинних стандартів. Заготовки піддавалися механічній обробці з використанням охолодження з метою запобігання локальному перегріву та зміни структури матеріалу.

2.2 Методики термічної обробки сталі 30MnB5

Методики термічної обробки, застосовані в даній роботі, були спрямовані на формування різних структурних станів сталі марки 30MnB5 з метою оцінки їх впливу на механічні властивості матеріалу. Вибір режимів термічної обробки здійснювався з урахуванням вимог нормативної документації, даних літературних джерел та поставлених задач дослідження.

Термічна обробка зразків включала операції нагріву до заданої температури, витримки при цій температурі та подальшого охолодження у воді. Нагрів зразків проводився в електричній муфельній печі з автоматичним регулюванням температури, що забезпечувало стабільність температурного режиму протягом усього процесу обробки. Контроль температури здійснювався за допомогою термопар і вбудованої системи керування печі.

Гартування зразків проводили з аустенітного стану. Температура нагріву під гартування вибиралася в інтервалі, що забезпечує повну аустенізацію сталі, з урахуванням її хімічного складу та товщини зразків. Тривалість витримки при температурі нагріву визначалася з урахуванням забезпечення рівномірного прогріву по всьому перерізу матеріалу. Після витримки зразки швидко охолоджувалися у гартувальному середовищі – воді, що забезпечувало формування пересиченої твердого розчину та утворення мартенситної структури.

Для зниження внутрішніх напружень і коригування механічних властивостей після загартування зразки піддавалися відпуску. Відпуск проводився при різних температурах, що дозволяло оцінити вплив цього параметра на твердість, міцність і ударну в’язкість сталі. Залежно від температури відпуску відбувалися процеси розпаду мартенситу, виділення карбідних фаз і стабілізації структури, що суттєво впливало на кінцеві властивості матеріалу.

Варіанти запропонованих в даній роботі технологій термічного оброблення гарячекатаної сталі марки 30NnB5 із їх характеристиками наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Варіанти експериментальних режимів термічної обробки сталі 30MnB5

№ режиму	Гартування	Середовище охолодження	Відпуск	Характеристика режиму
1	850…880 °C Аустенізація	Вода	–	Загартування без відпуску
2			Низькотемпературний 200°C	Підвищена міцність
3			Середньотемпературний 500°C	Оптимальний комплекс властивостей
Примітка: Зазначені режими обрані для порівняльної оцінки впливу параметрів термічної обробки на властивості сталі.				

У межах дослідження також передбачалося застосування різних варіантів термічної обробки з метою порівняльної оцінки ефективності режимів. Це дозволило простежити закономірності зміни механічних характеристик сталі 30MnB5 залежно від параметрів нагріву, охолодження та відпуску, а також визначити найбільш доцільні режими з точки зору формування оптимального комплексу властивостей (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Схема загартування та відпуску сталі 30MnB5

Таким чином, обрані методики термічної обробки забезпечують можливість комплексного дослідження впливу технологічних параметрів на структуру і механічні властивості сталі марки 30MnB5 та є достатніми для досягнення мети даної роботи.

2.3 Методи визначення механічних властивостей

Для оцінки впливу режимів термічної обробки на експлуатаційні характеристики сталі марки 30MnB5 у роботі застосовувався комплекс методів визначення механічних властивостей. Обрані методи дозволяють всебічно охарактеризувати міцнісні, деформаційні та ударні властивості матеріалу і відповідають вимогам чинних нормативних документів.

Механічні випробування на розтяг проводилися з метою визначення основних характеристик міцності та пластичності сталі, зокрема межі текучості, межі міцності та відносного подовження. Випробування виконувалися на стандартних зразках за кімнатної температури відповідно до вимог державних стандартів. Під час випробувань реєструвалися діаграми деформування, на основі яких визначалися необхідні показники механічних властивостей.

Твердість зразків визначали з метою оцінки опору матеріалу пластичній деформації та порівняння ефективності різних режимів термічної обробки. Вимірювання твердості проводилися на поверхні зразків після відповідної підготовки згідно з вимогами стандартів. Отримані значення твердості дозволяли оцінити рівень зміцнення сталі після загартування та зміну властивостей у результаті відпуску.

Для визначення здатності матеріалу чинити опір ударним навантаженням проводилися випробування на ударну в’язкість. Цей показник є особливо важливим для сталей, що експлуатуються в умовах динамічних навантажень і можливих ударів. Випробування виконувалися на зразках із концентраторами напружень при нормальній температурі, що дозволяло оцінити характер руйнування та енергетичні витрати на руйнування матеріалу.

Отримані результати механічних випробувань використовувалися для порівняльного аналізу впливу різних режимів термічної обробки на властивості сталі 30MnB5. Узагальнення експериментальних даних дозволило встановити

закономірності зміни міцнісних і деформаційних характеристик залежно від структурного стану матеріалу.

Таким чином, застосований комплекс методів визначення механічних властивостей забезпечує достовірну оцінку ефективності обраних режимів термічної обробки та є достатнім для досягнення мети даної кваліфікаційної роботи.

2.4 Методи дослідження мікроструктури

Дослідження мікроструктури сталі марки 30MnB5 проводилося з метою встановлення зв’язку між режимами термічної обробки, структурним станом матеріалу та його механічними властивостями. Аналіз мікроструктури дозволяє оцінити характер фазових перетворень, розмір і форму зерен, а також рівномірність розподілу структурних складових у металі.

Для металографічних досліджень із дослідного матеріалу виготовлялися зразки встановлених розмірів. Підготовка зразків включала механічне шліфування з поступовим зменшенням зернистості абразивного матеріалу, а також полірування до отримання дзеркальної поверхні. Така підготовка забезпечувала чітке відтворення структурних елементів при подальшому мікроскопічному аналізі.

Для виявлення мікроструктури підготовлені зразки піддавалися хімічному травленню з використанням відповідних реактивів, що дозволяло чітко розмежувати структурні складові сталі. Вибір травильного середовища здійснювався з урахуванням хімічного складу матеріалу та поставлених задач дослідження.

Спостереження та аналіз мікроструктури проводилися за допомогою оптичного металографічного мікроскопа при різних збільшеннях. У процесі досліджень визначали тип мікроструктури, форму та розмір зерен,

співвідношення структурних фаз, а також наявність можливих дефектів структури. Особливу увагу приділяли порівнянню мікроструктур зразків у вихідному стані та після різних режимів термічної обробки.

Отримані результати металографічних досліджень використовувалися для пояснення змін механічних властивостей сталі залежно від структурного стану. Порівняльний аналіз мікроструктур дозволив встановити закономірності впливу загартування та відпуску на формування мартенситних, феритних і перехідних структур, а також оцінити однорідність структури по перерізу зразків.

Таким чином, застосовані методи дослідження мікроструктури забезпечують наочне та обґрунтоване підтвердження впливу режимів термічної обробки на структуру і властивості сталі марки 30MnB5 та доповнюють результати механічних випробувань.

3 РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

У даному розділі наведено результати експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку впливу режимів термічної обробки на механічні властивості та мікроструктуру сталі марки 30MnB5. Аналіз отриманих даних дозволяє встановити закономірності формування експлуатаційних характеристик матеріалу залежно від параметрів загартування та відпуску, а також обґрунтувати доцільність застосування окремих режимів термічної обробки.

Результати механічних випробувань і металографічних досліджень розглядаються у взаємозв’язку, що забезпечує комплексну оцінку структурного стану матеріалу та його властивостей. Такий підхід дозволяє обґрунтовано пояснити зміни механічних характеристик сталі залежно від сформованої мікроструктури.

3.1 Вплив режимів загартування та відпуску на механічні властивості сталі 30MnB5

У процесі дослідження було встановлено, що механічні властивості сталі марки 30MnB5 суттєво залежать від параметрів термічної обробки. Вихідний стан гарячекатаного прокату характеризувався помірними показниками міцності, які не перевищували значення та твердості при відносно високій пластичності, що є типовим для ферито-перлітної структури (табл. 3.1).

Проведення загартування призводило до різкого підвищення твердості та міцності матеріалу, що зумовлено формуванням мартенситної структури. При цьому спостерігалося зниження пластичності та ударної в’язкості, що є характерною особливістю загартованих сталей. Зі збільшенням інтенсивності

загартування відзначалося зростання рівня внутрішніх напружень, що могло негативно впливати на експлуатаційну надійність виробів без подальшого відпуску.

Таблиця 3.1 – Характер зміни механічних властивостей сталі 30MnB5 після термічної обробки

Режим	Твердість, HB	Міцність $\sigma_в$, МПа	Пластичність δ, %	Ударна в'язкість KCU, Дж/см^2
Вихідний стан без ТО	180	380	28	98
Загартування	430	1410	3	12
Загартування + відпуск від 200°C	380	1050	8	26
Загартування + відпуск від 500°C	315	840	15	74

Після проведення відпуску механічні властивості сталі зазнавали суттєвих змін. Зі зростанням температури відпуску спостерігалося зниження твердості та межі міцності, що супроводжувалося підвищенням пластичності та ударної в'язкості матеріалу. Це пояснюється процесами розпаду пересиченого мартенситу, зменшенням внутрішніх напружень і формуванням більш стабільної структури.

Порівняльний аналіз результатів показав, що для сталі 30MnB5 найбільш доцільними є режими термічної обробки, які забезпечують компроміс між високою міцністю та достатньою ударною в'язкістю. Такі режими дозволяють отримати оптимальний комплекс механічних властивостей, необхідний для експлуатації виробів в умовах інтенсивних механічних та ударних навантажень.

Отримані результати підтверджують, що мікролегування бором у поєднанні з раціонально підібраними режимами загартування та відпуску

забезпечує сталі 30MnB5 високий рівень експлуатаційних характеристик і розширює можливості її промислового застосування.

3.2 Аналіз отриманих мікроструктур

Металографічні дослідження дозволили встановити характерні особливості мікроструктури сталі марки 30MnB5 у вихідному стані та після різних режимів термічної обробки. Аналіз отриманих структурних зображень проводився з метою пояснення змін механічних властивостей матеріалу та встановлення взаємозв’язку між структурним станом і експлуатаційними характеристиками сталі.

У вихідному стані гарячекатаного прокату мікроструктура сталі 30MnB5 характеризувалася наявністю ферито-перлітної суміші з відносно рівномірним розподілом фаз (рис. 3.1). Зерна фериту мали витягнуту форму, що є типовим для гарячекатаних матеріалів, а перліт розташовувався у вигляді окремих колоній. Така структура забезпечувала достатню пластичність, однак не дозволяла досягти високих показників твердості та зносостійкості.

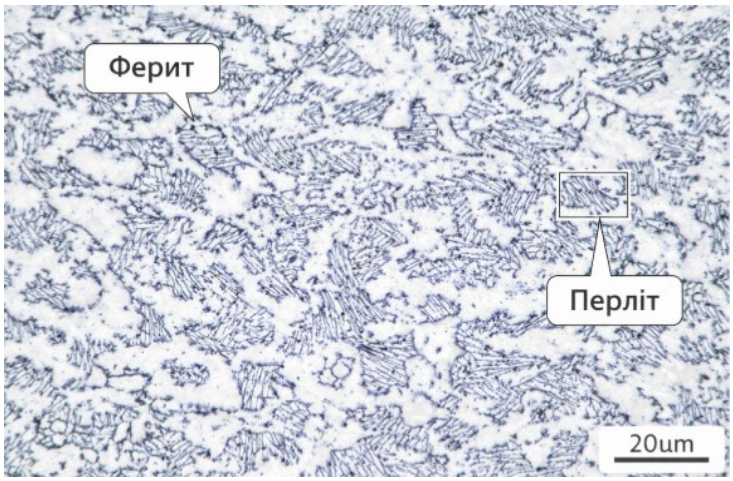


Рисунок 3.1 – Вихідна ферито-перлітна мікроструктура сталі 30MnB5 у гарячекатаному стані

Після проведення загартування спостерігалося суттєве перетворення мікроструктури матеріалу. У структурі переважала мартенситна фаза, яка характеризується високою дисперсністю та підвищеною твердістю (рис. 3.2). При цьому відзначалася достатня рівномірність розподілу мартенситу по перерізу зразків, що свідчить про високу прогартовуваність сталі 30MnB5, зумовлену наявністю марганцю та мікродобавок бору.

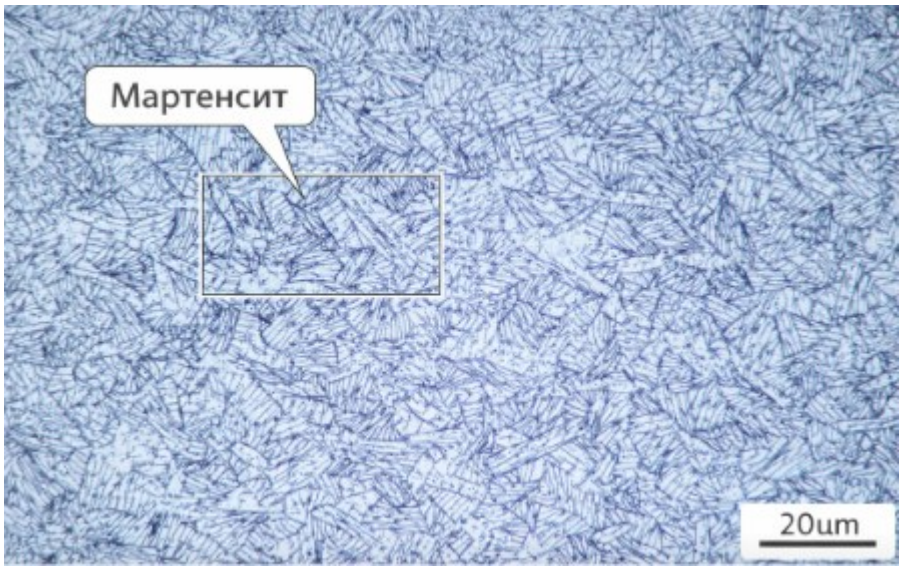


Рисунок 3.2 – Мартенситна мікроструктура сталі 30MnB5 після загартування

Мікроструктура зразків після відпуску зазнавала помітних змін залежно від температури цього процесу. За нижчих температур відпуску зберігалася структура відпущеного мартенситу з високою дисперсністю карбідних виділень, що відповідало підвищеним показникам міцності та твердості. Зі зростанням температури відпуску відзначалося укрупнення карбідних частинок і часткове відновлення феритної матриці, що сприяло підвищенню пластичності та ударної в’язкості матеріалу (рис. 3.3).

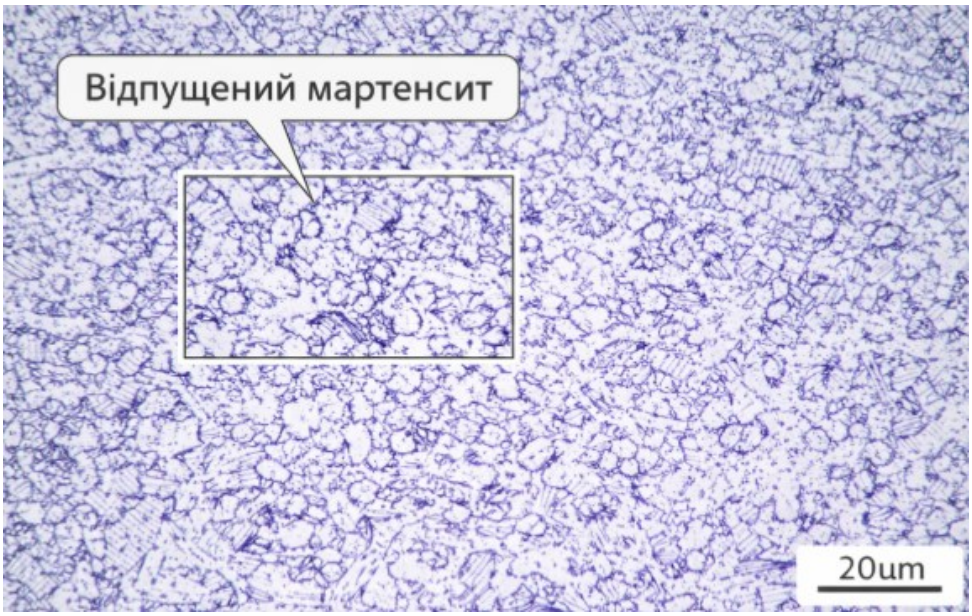


Рисунок 3.3 – Відпущений мартенсит у сталі 30MnB5 після термічної обробки

Порівняльний аналіз мікроструктур показав, що оптимальне поєднання структурних складових досягається за режимів термічної обробки, які забезпечують формування дрібнодисперсного відпущеного мартенситу з рівномірним розподілом фаз. Саме така структура забезпечує сприятливий баланс між високою міцністю та здатністю матеріалу поглинати енергію удару.

Отримані результати металографічних досліджень підтверджують тісний взаємозв’язок між структурним станом сталі 30MnB5 та її механічними властивостями. Формування однорідної мартенситно-бейнітної або мартенситної структури після загартування з подальшим раціональним відпуском є визначальним фактором підвищення експлуатаційної надійності виробів із даної сталі.

3.3 Порівняльна оцінка ефективності експериментальних режимів термічної обробки

Порівняльна оцінка експериментальних режимів термічної обробки сталі марки 30MnB5 проводилася на основі аналізу отриманих механічних властивостей і результатів металографічних досліджень. Такий підхід дозволив комплексно оцінити ефективність кожного режиму з точки зору формування оптимального поєднання міцності, твердості та ударної в’язкості матеріалу.

Аналіз результатів показав, що застосування загартування без подальшого відпуску забезпечує максимальні значення твердості та міцності сталі. Однак такий структурний стан супроводжується підвищеною крихкістю та високим рівнем внутрішніх напружень, що обмежує можливість практичного використання виробів без додаткової термічної обробки. Тому режими, які включають лише загартування, можуть бути доцільними лише для виробів, що не зазнають ударних або змінних навантажень.

Режими загартування з подальшим низькотемпературним відпуском характеризуються збереженням високого рівня міцності при незначному підвищенні пластичності. Такий підхід дозволяє частково знизити внутрішні напруження, однак ударна в’язкість матеріалу залишається обмеженою, що знижує експлуатаційну надійність виробів у складних умовах навантаження.

Найбільш збалансовані механічні властивості спостерігалися у зразків, які піддавалися загартуванню з подальшим середньотемпературним відпуском. У цьому випадку досягалося оптимальне поєднання високої міцності та достатньої ударної в’язкості, що підтверджується як результатами механічних випробувань, так і характером сформованої мікроструктури. Формування дрібнодисперсного відпущеного мартенситу забезпечувало стабільність властивостей та рівномірність їх розподілу по перерізу матеріалу.

Порівняльний аналіз також показав, що мікролегування бором істотно підвищує ефективність термічної обробки сталі 30MnB5. Завдяки підвищеній

прогартовуваності забезпечується формування однорідної структури навіть за відносно м’яких режимів охолодження, що знижує ризик утворення структурної неоднорідності та локального зниження механічних властивостей.

Отже, результати досліджень свідчать, що найбільш доцільними для практичного застосування є режими термічної обробки сталі 30MnB5, які включають загартування з подальшим середньотемпературним відпуском. Саме такі режими дозволяють забезпечити оптимальний комплекс механічних властивостей і можуть бути рекомендовані для використання у виробничих умовах при виготовленні деталей, що працюють в умовах інтенсивних механічних та ударних навантажень.

ВИСНОВКИ

У результаті виконання дипломної кваліфікаційної роботи було проведено комплексне дослідження впливу режимів термічної обробки на структуру та механічні властивості середньовуглецевої низьколегованої боровмісної сталі марки 30MnB5. Проведений аналіз літературних джерел підтвердив актуальність використання даної марки сталі для виготовлення деталей і виробів, що працюють в умовах підвищених механічних, ударних та абразивних навантажень.

Встановлено, що мікролегування бором є ефективним способом підвищення прогартовуваності конструкційних сталей. Наявність бору у складі сталі 30MnB5 сприяє формуванню однорідної структури по перерізу прокату після загартування та забезпечує підвищений рівень міцності і зносостійкості без істотного погіршення пластичних властивостей.

Дослідження механічних властивостей показали, що вихідний стан гарячекатаного прокату характеризується задовільною пластичністю, однак не забезпечує необхідного рівня міцності та твердості для експлуатації в умовах інтенсивних навантажень. Проведення загартування призводить до значного підвищення твердості та міцності сталі, проте супроводжується зниженням ударної в’язкості.

Встановлено, що застосування відпуску після загартування є обов’язковою умовою формування оптимального комплексу механічних властивостей. Зі збільшенням температури відпуску спостерігається зменшення внутрішніх напружень, підвищення пластичності та ударної в’язкості матеріалу при допустимому зниженні показників міцності та твердості.

Металографічні дослідження підтвердили, що зміна механічних властивостей сталі 30MnB5 безпосередньо пов’язана з трансформацією її мікроструктури. Формування мартенситної структури після загартування та дрібнодисперсного відпущеного мартенситу після раціонального відпуску

забезпечує сприятливе поєднання міцності, твердості та здатності матеріалу поглинати енергію удару.

На основі порівняльної оцінки експериментальних режимів термічної обробки встановлено, що найбільш ефективними є режими, які включають загартування з подальшим середньотемпературним відпуском. Такі режими дозволяють отримати оптимальний комплекс механічних властивостей і можуть бути рекомендовані для практичного застосування при виготовленні відповідальних деталей із сталі марки 30MnB5.

Результати виконаної роботи можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів термічної обробки на металургійних та машинобудівних підприємствах, зокрема при виробництві гарячекатаного прокату та деталей із підвищеними вимогами до зносостійкості та ударної міцності.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бялік О.М., Черненко В.С., Писаренко В.М., Москаленко Ю.Н. Металознавство: підручник. Київ: ІВЦ «Політехніка», 2001. 375 с.

2. Полянський П.М. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: конспект лекцій. Миколаїв: Миколаївський національний аграрний університет, 2014. 111 с.

3. Плескач В. М., Козловський В. О., Федоренко О. І. Технологічні методи виробництва заготовок деталей машин. Київ: НТУУ «КПІ», 2013. 312 с.

4. ДСТУ EN 10083-3:2017. Сталі для загартування та відпуску. Частина 3. Технічні умови постачання легованих сталей. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.

5. Мохорт А.В., Чумак М.Г. Термічна обробка металів: навчальний посібник. Київ: Либідь, 2002. 512 с.

6. Кузін О.А., Яцюк Р.А. Металознавство та термічна обробка металів: підручник. Львів: вид-во «Афіша», 2002. 304 с.

7. Davis J. R. Alloying: Understanding the Basics. Materials Park. OH: ASM International, 2001. 351 p.

8. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance. 2nd ed. Materials Park. OH: ASM International, 2015. 640 p.