

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Механіко-технологічний факультет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»

Зав. кафедрою МЛВ

к.т.н. доцент

_____ Олександр КУЗИК
“ _____ ” _____ 2026 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за першим (бакалаврським) рівнем
вищої освіти

на тему

**«Дослідження впливу температури ізотермічного
гартування на структуру та властивості
високоміцного чавуну»**

«Study of the influence of isothermal quenching temperature on the
structure and properties of high-strength cast iron»

Виконала здобувачка вищої освіти:

IV курсу, групи МЗ-23-мб
ОПП «Прикладне матеріалознавство та інжиніринг»
спеціальності 132 «Матеріалознавство»

_____ Балакай О.П.

Керівник роботи:

к.т.н. доцент _____ Олександр КУЗИК

Рецензент: _____

Центральноукраїнський національний технічний університет
Механіко-технологічний факультет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва
Рівень вищої освіти _____ перший (бакалаврський) _____
Галузь знань 13 Механічна інженерія _____
Спеціальність 132 "Матеріалознавство" _____
Освітньо-професійна програма «Прикладне матеріалознавство та інжиніринг»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувача кафедри _____
к.т.н. доцент, Олександр КУЗИК
" ____ " _____ 2026 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ПЕРШИМ
(БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

Балакай Олена Петрівна

1. Тема роботи: "Дослідження впливу темпера-тури ізотермічного гартування на структуру та властивості високо-міцного чавуну"
2. Керівник роботи Кузик Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва. Затверджена наказом вищого навчального закладу від "13"березня 2026 року № 166-02.
3. Строк подання роботи до захисту "15" червня 2026 року.
4. Метою роботи є дослідження впливу температури ізотермічного гартування на структуру та механічні властивості високоміцного чавуну з кулястим графітом, а також визначення раціонального режиму термічної обробки для забезпечення оптимального поєднання міцності, твердості, пластичності та ударної в'язкості матеріалу.
Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:
 - проаналізувати науково-технічну літературу за темою дослідження;
 - обґрунтувати вибір матеріалу та режимів ізотермічного гартування;
 - провести термічну обробку дослідних зразків;
 - дослідити мікроструктуру високоміцного чавуну після термічної обробки;
 - визначити твердість дослідних зразків;
 - дослідити механічні властивості високоміцного чавуну;
 - встановити вплив температури ізотермічного гартування на структуру та властивості матеріалу;
 - визначити раціональну температуру ізотермічного гартування високоміцного чавуну.
5. Перелік графічного матеріалу:
 - схеми режимів термічної обробки;
 - мікроструктури високоміцного чавуну;
 - результати вимірювання твердості;
 - графіки механічних властивостей;
 - фрактограми поверхонь руйнування.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	доц., Олександр КУЗИК		
Розділ 2	доц., Олександр КУЗИК		
Розділ 3	доц., Олександр КУЗИК		

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1	10.04.2026	
2	Розділ 2	30.04.2026	
3	Розділ 3	20.05.2026	
4	Оформлення пояснювальної записки та презентації роботи	12.06.2026	

Дата видачі завдання

«16» 03 2026 року

Керівник роботи

_____ Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

«_____» _____ 2026 року

_____ Олена БАЛАКАЙ

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну роботу за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти виконала здобувачка вищої освіти Балакай Олена Петрівна студент IV курсу, групи МЗ-23-мб, ОПП «Прикладне матеріалознавство та інжиніринг» спеціальності 132 Матеріалознавство на тему "Дослідження впливу температури ізотермічного гартування на структуру та властивості високо-міцного чавуну", ЦНТУ, 2026. 61 с. У бакалаврській роботі досліджено вплив температури ізотермічного гартування на структуру та механічні властивості високоміцного чавуну з кулястим графітом. Робота присвячена визначенню раціонального режиму термічної обробки, який забезпечує оптимальне поєднання міцності, твердості, пластичності та ударної в'язкості матеріалу.

У першому розділі виконано аналіз науково-технічної літератури щодо структури, властивостей та особливостей застосування високоміцних чавунів із кулястим графітом. Розглянуто вплив форми графітових включень і структури металевої основи на механічні властивості матеріалу. Наведено відомості про ізотермічне гартування як один із найбільш ефективних способів підвищення експлуатаційних характеристик високоміцного чавуну. Проаналізовано особливості формування структури під час ізотермічної витримки та вплив температури термічної обробки на комплекс механічних властивостей матеріалу.

У другому розділі наведено характеристику матеріалу дослідження та описано методику проведення експериментальних робіт. Дослідження виконували на зразках із високоміцного чавуну з кулястим графітом. Термічна обробка включала аустенітизацію за температури 900 °С з витримкою 30 хвилин та подальше ізотермічне гартування за температур 280 °С, 310 °С і 350 °С з витримкою 180 хвилин. Для оцінювання впливу термічної обробки на властивості матеріалу проведено металографічні дослідження, вимірювання твердості за методом Брінелля, випробування на розтяг та визначення ударної в'язкості.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень та їх аналіз. Встановлено, що температура ізотермічного гартування суттєво

впливає на структурний стан металевої основи та механічні властивості високоміцного чавуну. Показано, що при температурі 280 °С формується найбільш дисперсна структура, яка забезпечує максимальні значення твердості та межі міцності. Підвищення температури до 350 °С сприяє зростанню пластичності, однак супроводжується зниженням міцнісних характеристик. Найбільш збалансований комплекс властивостей отримано після ізотермічного гартування за температури 310 °С. Для даного режиму характерне поєднання високої міцності, достатньої пластичності та максимального значення ударної в'язкості.

На основі результатів металографічних, фрактографічних та механічних досліджень встановлено закономірності впливу температури ізотермічного гартування на структуру та властивості високоміцного чавуну з кулястим графітом. Обґрунтовано доцільність використання температури 310 °С як раціонального режиму ізотермічного гартування для забезпечення оптимального комплексу експлуатаційних характеристик матеріалу.

Результати роботи можуть бути використані при розробленні технологічних процесів термічної обробки високоміцних чавунів, а також під час виготовлення деталей машин і механізмів, які працюють в умовах значних статичних, циклічних та ударних навантажень.

Ключові слова: високоміцний чавун, кулястий графіт, ізотермічне гартування, термічна обробка, мікроструктура, твердість, межа міцності, пластичність, ударна в'язкість, механічні властивості.

ABSTRACT

The bachelor's qualification thesis was completed by Olena Balakai, a fourth-year student of group MZ-23-mb of the Educational and Professional Program “Applied Materials Science and Engineering”, specialty 132 Materials Science, on the topic: “Investigation of the Influence of Austempering Temperature on the Structure and Properties of Ductile Iron”.

The thesis investigates the influence of austempering temperature on the formation of microstructure and mechanical properties of ductile iron with spheroidal

graphite. The relevance of the study is determined by the growing demand for high-strength engineering materials capable of operating under significant static, cyclic, and impact loads. Austempering is one of the most effective heat treatment methods for improving the performance characteristics of ductile iron through controlled microstructural transformation.

The aim of the work was to study the effect of austempering temperature on the structure and mechanical properties of ductile iron and to determine the rational heat treatment regime that provides an optimal combination of strength, hardness, ductility, and impact toughness.

The first chapter presents a review of scientific and technical literature concerning the structure, properties, and application of ductile iron with spheroidal graphite. Particular attention is paid to the influence of graphite morphology on mechanical properties, the principles of austempering, and the relationship between heat treatment parameters and structural transformations occurring in the metallic matrix.

The second chapter describes the materials and experimental procedures used in the study. The investigated material was ductile iron with spheroidal graphite. Heat treatment included austenitizing at 900 °C for 30 minutes followed by austempering at temperatures of 280 °C, 310 °C, and 350 °C for 180 minutes. Metallographic examinations, fractographic analysis, hardness measurements according to the Brinell method, tensile testing, and impact toughness evaluation were carried out to determine the influence of heat treatment on the material properties.

The third chapter presents the experimental results and their analysis. It was established that the austempering temperature has a significant influence on the microstructure and mechanical properties of ductile iron. The treatment at 280 °C resulted in the highest hardness (435 HB) and tensile strength (1320 MPa) due to the formation of a highly dispersed matrix structure. Increasing the austempering temperature to 350 °C led to improved ductility but caused a reduction in hardness and strength. The most balanced combination of mechanical properties was achieved after austempering at 310 °C, providing a hardness of 410 HB, tensile strength of 1250 MPa, elongation of 4.5%, and maximum impact toughness of 6.8 kg·m/cm².

Based on metallographic, fractographic, and mechanical investigations, the relationship between austempering temperature, microstructure, and mechanical properties of ductile iron was established. The temperature of 310 °C was determined to be the most rational austempering regime, ensuring the optimal balance between strength, ductility, and impact toughness.

The results of this study may be used in the development of heat treatment technologies for ductile irons and in the manufacture of machine components operating under demanding service conditions.

Keywords: ductile iron, spheroidal graphite, austempering, heat treatment, microstructure, fractography, hardness, tensile strength, ductility, impact toughness.

Висновки до розділу 3.....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
Список використаних джерел.....	60
Додатки.....	62

ВСТУП

Високоміцний чавун із кулястим графітом належить до сучасних конструкційних матеріалів, які широко використовуються в машинобудуванні, транспортній галузі, енергетиці та сільськогосподарському машинобудуванні. Поєднання високої міцності, достатньої пластичності, доброї зносостійкості та порівняно невисокої собівартості робить його ефективною альтернативою багатьом маркам сталей при виготовленні відповідальних деталей машин і механізмів.

Одним із найбільш ефективних способів підвищення експлуатаційних властивостей високоміцного чавуну є застосування термічної обробки. Особливий інтерес становить ізотермічне гартування, у результаті якого формується специфічна структура металевої основи, що складається з бейнітного фериту та залишкового аустеніту. Така структура забезпечує високий комплекс механічних властивостей, зокрема підвищену міцність, твердість і зносостійкість.

Відомо, що температура ізотермічного гартування суттєво впливає на процеси структуроутворення у високоміцному чавуні. Зміна температури ізотермічної витримки призводить до зміни співвідношення структурних складових, кількості залишкового аустеніту та морфології бейнітної структури, що безпосередньо відображається на механічних властивостях матеріалу. Тому встановлення закономірностей впливу температури ізотермічного гартування на структуру та властивості високоміцного чавуну є актуальним завданням сучасного матеріалознавства.

Результати таких досліджень мають практичне значення під час розроблення технологічних режимів термічної обробки деталей машин, які працюють в умовах підвищених механічних навантажень та інтенсивного зношування. Оптимізація параметрів ізотермічного гартування дозволяє отримувати необхідний комплекс властивостей без використання дорогих легувальних елементів або складних технологічних операцій.

Метою роботи є дослідження впливу температури ізотермічного гартування на структуру та механічні властивості високоміцного чавуну з кулястим графітом, а також визначення раціонального режиму термічної обробки для забезпечення оптимального поєднання міцності, твердості, пластичності та ударної в'язкості матеріалу.

Завдання дослідження

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз науково-технічної літератури щодо структури, властивостей та особливостей термічної обробки високоміцного чавуну з кулястим графітом.
2. Обґрунтувати вибір матеріалу дослідження та режимів ізотермічного гартування.
3. Провести термічну обробку дослідних зразків за різних температур ізотермічної витримки.
4. Дослідити особливості мікроструктури високоміцного чавуну після ізотермічного гартування.
5. Виконати вимірювання твердості зразків після термічної обробки.
6. Визначити механічні властивості досліджуваного матеріалу, зокрема межу міцності, відносне подовження та ударну в'язкість.
7. Встановити закономірності впливу температури ізотермічного гартування на структуру та механічні властивості високоміцного чавуну.
8. Визначити раціональну температуру ізотермічного гартування, що забезпечує найбільш збалансований комплекс експлуатаційних властивостей матеріалу.

Об'єкт дослідження

Об'єктом дослідження є процес формування структури та властивостей високоміцного чавуну з кулястим графітом під час ізотермічного гартування.

Предмет дослідження

Предметом дослідження є вплив температури ізотермічного гартування (280 °С, 310 °С та 350 °С) на мікроструктуру, твердість, межу міцності, пластичність та ударну в'язкість високоміцного чавуну з кулястим графітом.

Практичне значення роботи полягає у визначенні раціональних температурних режимів ізотермічного гартування високоміцного чавуну, які можуть бути використані для підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин та обладнання різного призначення.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ З КУЛЯСТИМ ГРАФІТОМ

1.1 Високоміцний чавун та його властивості

Чавун належить до найбільш поширених конструкційних матеріалів, які широко застосовуються в машинобудуванні, транспортному машинобудуванні, енергетичній галузі та ливарному виробництві. Чавунами називають сплави заліза з вуглецем, вміст якого перевищує 2,14 %. Крім вуглецю, до складу чавунів входять кремній, марганець, фосфор, сірка та інші елементи, які суттєво впливають на процеси структуроутворення та експлуатаційні властивості матеріалу.

Особливістю чавунів є наявність вуглецю не лише у зв'язаному стані у вигляді цементиту, але й у вільному стані у формі графіту. Саме форма, розміри та характер розподілу графітових включень значною мірою визначають механічні та технологічні властивості матеріалу. Залежно від форми графіту розрізняють сірі, високоміцні, ковкі та вермикулярні чавуни. Важливим аспектом оцінювання структури високоміцних чавунів є класифікація форми графітових включень. У зв'язку з тим, що значна частина замовників литих виробів орієнтується на вимоги міжнародних стандартів, виникає необхідність уніфікації підходів до оцінювання мікроструктури та гармонізації вітчизняних нормативних документів із міжнародними вимогами.

Міжнародний стандарт ISO 945-1:2008 встановлює класифікацію графітових включень у чавунах на основі їх морфології. Відповідно до даного стандарту виділяють шість основних форм графіту, серед яких пластинчастий графіт відповідає формі I, вермикулярний — формі III, а кулястий (сфероїдальний) — формі VI (рис. 1.1).

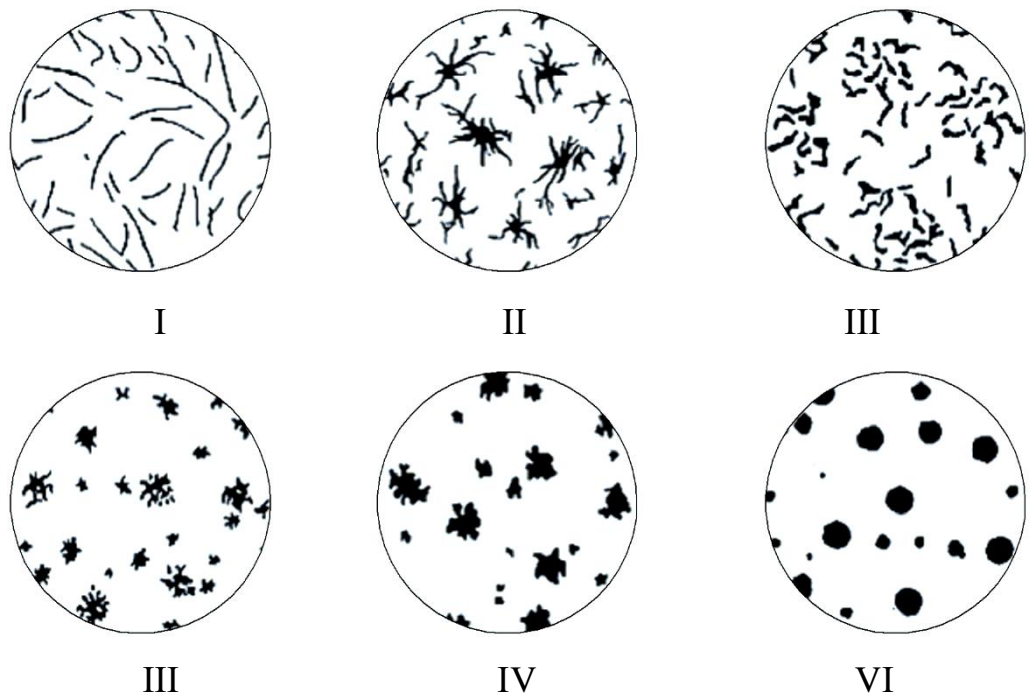


Рисунок 1.1 – Основні морфологічні типи графітових включень у чавунах згідно з ISO 945-1:2008

Така класифікація дозволяє здійснювати стандартизоване оцінювання структури чавунів та порівнювати результати досліджень незалежно від країни виробника.

Особливий інтерес для сучасного машинобудування становлять чавуни з вермикулярним та кулястим графітом, оскільки саме вони забезпечують найбільш сприятливе поєднання міцності, пластичності, теплопровідності та ливарних властивостей. У міжнародній практиці вермикулярний графіт часто називають компактним графітом (Compacted Graphite Iron, CGI).

Подальший розвиток системи класифікації графітових включень отримав у стандарті ISO 16112:2006, який передбачає більш детальне оцінювання морфології компактного графіту з використанням кількісних параметрів форми. Такий підхід дозволяє підвищити точність структурного аналізу та забезпечити більш об'єктивне прогнозування властивостей чавунів залежно від особливостей їх мікроструктури.

Найбільш високими механічними властивостями серед графітизованих чавунів характеризується високоміцний чавун з кулястим графітом. Такий матеріал отримують шляхом модифікування рідкого чавуну магнієм або магнійвмісними лігатурами, внаслідок чого пластинчастий графіт набуває

кулястої форми. На відміну від пластинчастих включень, кулястий графіт значно менше концентрує напруження в металевій основі, що забезпечує суттєве підвищення міцності та пластичності матеріалу.

Високоміцний чавун поєднує високу міцність, достатню пластичність, добру зносостійкість і задовільні ливарні властивості. За рівнем механічних характеристик окремі марки високоміцного чавуну наближаються до конструкційних сталей, а в деяких випадках навіть перевищують їх за показниками втомної міцності, демпфувальної здатності та зносостійкості. При цьому технологія виготовлення литих деталей із високоміцного чавуну є менш енергоємною порівняно з виробництвом аналогічних деталей зі сталі.

Структура високоміцного чавуну складається з металевої основи та графітових включень кулястої форми. Металева основа може бути феритною, перлітною, феритно-перлітною, бейнітною або мартенситною залежно від хімічного складу та режимів термічної обробки. Від структури металевої основи значною мірою залежать твердість, міцність, пластичність та інші експлуатаційні характеристики матеріалу.

Феритна структура забезпечує високі показники пластичності та ударної в'язкості, проте характеризується порівняно невисокою твердістю та міцністю. Перлітна структура, навпаки, сприяє підвищенню міцності та твердості, однак дещо знижує пластичність матеріалу. Для отримання оптимального поєднання механічних властивостей часто застосовують термічну обробку, яка дозволяє формувати більш дисперсні структури металевої основи.

Механічні властивості високоміцного чавуну визначаються насамперед двома основними чинниками: характеристиками графітових включень та структурою металевої основи. Саме поєднання цих складових формує комплекс експлуатаційних властивостей матеріалу та визначає сферу його застосування.

Першим і найбільш важливим чинником є форма, розміри, кількість та характер розподілу графітових включень. Графітові частинки фактично розривають суцільність металевої основи та створюють локальні концентратори напружень. Тому зі збільшенням розмірів графітових включень або погіршенням їх форми механічні властивості чавуну погіршуються. Найсприятливішою є

структура з дрібними рівномірно розподіленими графітовими включеннями кулястої форми, які мінімально впливають на несучу здатність металевої основи.

На процес графітизації істотно впливають умови кристалізації та охолодження виливка. При повільному охолодженні створюються сприятливі умови для розкладання цементиту та виділення вуглецю у вигляді графіту. У результаті збільшується ступінь графітизації сплаву та формується структура з більшою кількістю графітових включень.

Другим важливим чинником є структура металевої основи. Залежно від хімічного складу та режимів охолодження металева основа може бути феритною, перлітною або феритно-перлітною. Феритна структура забезпечує підвищену пластичність і ударну в'язкість, проте характеризується відносно невисокими показниками міцності та твердості. Перлітна основа, навпаки, забезпечує вищу міцність і зносостійкість завдяки наявності в структурі цементиту. Феритно-перлітна структура займає проміжне положення та дозволяє отримати збалансований комплекс властивостей.

Покращення механічних характеристик чавуну досягається також шляхом модифікування розплаву перед заливанням у форми. Для цього використовують феросиліцій, силікокальцій та інші модифікатори, які сприяють утворенню великої кількості центрів кристалізації графіту та запобігають його укрупненню. Саме завдяки модифікуванню стає можливим отримання високоміцного чавуну з кулястим графітом та високим рівнем механічних властивостей.

На структуру і властивості високоміцного чавуну значний вплив справляє його хімічний склад. Найважливішими елементами є вуглець, кремній, марганець, сірка та фосфор.

Вуглець є основним елементом чавуну та безпосередньо впливає на формування його структури. У сплаві він може перебувати як у зв'язаному стані у вигляді цементиту, так і у вільному стані у вигляді графіту. Саме співвідношення між цими формами визначає рівень міцності, твердості та технологічних властивостей матеріалу.

Кремній є одним із найважливіших графітизуючих елементів. Він сприяє розкладанню цементиту та виділенню вуглецю у вигляді графіту. Крім того,

кремній покращує рідкотекучість чавуну та дещо знижує температуру його плавлення. Збільшення вмісту кремнію сприяє формуванню графітової структури та покращує оброблюваність матеріалу різанням.

Марганець діє протилежно кремнію і сприяє утворенню цементиту. Він підвищує твердість та міцність чавуну, однак надмірний його вміст може призвести до збільшення крихкості матеріалу.

Сірка належить до шкідливих домішок. Вона погіршує рідкотекучість розплаву, сприяє утворенню тріщин та знижує механічні властивості чавуну. Тому її вміст у більшості випадків намагаються підтримувати на мінімальному рівні.

Фосфор у невеликих кількостях покращує ливарні властивості чавуну, підвищує його рідкотекучість та сприяє якісному заповненню ливарних форм. Разом з тим підвищений вміст фосфору призводить до зростання крихкості матеріалу та погіршення його експлуатаційних характеристик.

Таким чином, структура та властивості високоміцного чавуну формуються під комплексним впливом графітових включень, металевої основи та хімічного складу. Рациональне керування цими факторами дозволяє отримувати матеріал із необхідним поєднанням міцності, пластичності, твердості та зносостійкості.

Механічні властивості високоміцних чавунів регламентуються відповідними стандартами та залежать від марки матеріалу. Основні механічні характеристики деяких марок високоміцного чавуну наведено в табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні механічні властивості високоміцних чавунів

Марка чавуну	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %
ВЧ 400-15	400	250	15
ВЧ 500-7	500	320	7
ВЧ 600-3	600	370	3
ВЧ 700-2	700	420	2

Із підвищенням міцності, як правило, спостерігається збільшення твердості та одночасне зниження пластичності. Тому вибір марки чавуну здійснюється з урахуванням умов експлуатації конкретного виробу.

Завдяки високому комплексу експлуатаційних властивостей високоміцні чавуни широко використовуються для виготовлення колінчастих валів, шестерень, корпусних деталей, елементів ходових систем транспортних машин, деталей сільськогосподарської техніки, насосного обладнання та інших відповідальних виробів. У багатьох випадках вони дозволяють замінити дорожчі леговані сталі без погіршення експлуатаційних характеристик.

Подальше підвищення властивостей високоміцного чавуну досягається шляхом застосування різних видів термічної обробки. Одним із найбільш ефективних методів є ізотермічне гартування, яке забезпечує формування спеціальної структури металевої основи та суттєве покращення механічних характеристик матеріалу. Саме особливості формування структури під час ізотермічного гартування та її вплив на властивості високоміцного чавуну розглядаються в наступних підрозділах роботи.

1.2 Структура високоміцного чавуну з кулястим графітом

У високоміцних чавунах графіт присутній переважно у вигляді кулястих включень, формування яких забезпечується модифікуванням розплаву магнієм, церієм або іншими рідкісноземельними елементами. Як правило, вміст магнію після модифікування становить від 0,02 до 0,05 %, що є достатнім для зміни механізму кристалізації графіту та переходу від пластинчастої до кулястої форми включень. Саме сфероїдальна форма графіту істотно зменшує концентрацію напружень у металевій основі та забезпечує значне підвищення міцності, пластичності й ударної в'язкості матеріалу порівняно із сірими чавунами.

Процес формування графітових включень у високоміцному чавуні є складним і залежить від багатьох факторів, серед яких важливу роль відіграють характер центрів кристалізації, здатність цих центрів взаємодіяти з домішками та газами розплаву, а також швидкість дифузії вуглецю під час затвердіння. Зміна концентрації модифікувальних елементів впливає не лише на форму графіту, а й на особливості будови металевої матриці, морфологію міжфазних меж та характер розподілу структурних складових.

Структура металевої основи високоміцного чавуну значною мірою визначається умовами кристалізації та подальшої термічної обробки. Залежно від швидкості охолодження, хімічного складу та режимів обробки можуть формуватися феритна, ферито-перлітна або перлітна структури (рис. 1.2). Кожна з них характеризується специфічним поєднанням механічних та експлуатаційних властивостей.

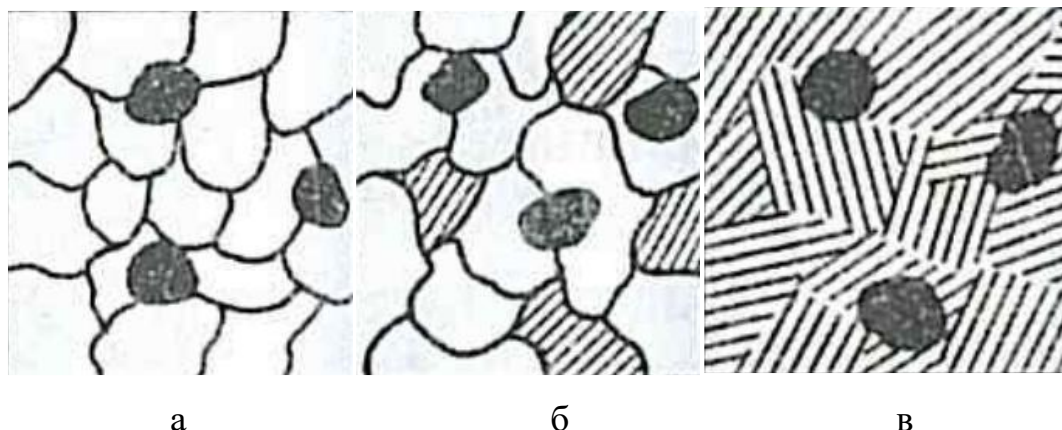


Рисунок 1.2 – Основні типи структури металевої матриці високоміцного чавуну з кулястим графітом: а – феритна; б – ферито-перлітна; в – перлітна

Феритна структура характеризується наявністю кулястих графітових включень, розташованих у феритній матриці (рис. 1.2, а). Така структура забезпечує високі показники пластичності, ударної в'язкості та добру оброблюваність різанням. Високоміцні чавуни з феритною основою застосовуються для виготовлення деталей, які працюють в умовах змінних та ударних навантажень і потребують підвищеної деформаційної здатності.

Ферито-перлітна структура (рис. 1.2, б) є проміжним варіантом між феритною та перлітною основами. У цьому випадку ферит і перліт рівномірно розподіляються в металевій матриці, забезпечуючи сприятливе поєднання міцності та пластичності. Саме ферито-перлітні високоміцні чавуни широко використовуються в машинобудуванні завдяки збалансованому комплексу механічних властивостей.

Перлітна структура (рис. 1.2, в) складається переважно з перліту та окремих кулястих графітових включень. Наявність значної кількості перліту сприяє підвищенню твердості, межі міцності та зносостійкості матеріалу. Такі чавуни характеризуються високим опором статичним і циклічним

навантаженням та застосовуються для виготовлення відповідальних деталей машин, валів, зубчастих коліс, елементів ходових систем і деталей, що працюють в умовах інтенсивного зношування.

Таким чином, експлуатаційні властивості високоміцного чавуну значною мірою визначаються структурою металевої основи. Зі збільшенням частки перліту підвищуються міцність, твердість та зносостійкість, проте зменшуються пластичність і ударна в'язкість. Водночас феритна структура забезпечує максимальну пластичність матеріалу. Саме тому керування співвідношенням структурних складових є одним із основних способів регулювання властивостей високоміцних чавунів залежно від умов їх подальшої експлуатації.

У промислових умовах найчастіше зустрічаються феритна, феритно-перлітна та перлітна структури металевої основи. Кожна з них забезпечує певне поєднання механічних властивостей і використовується залежно від умов експлуатації деталей.

Феритна структура характеризується високою пластичністю, добрими показниками ударної в'язкості та низькою твердістю. Такий чавун застосовують для деталей, які працюють в умовах динамічних навантажень та потребують підвищеної здатності до поглинання енергії деформації.

Перлітна структура забезпечує вищі показники міцності та твердості завдяки наявності в металевій основі перліту, який являє собою механічну суміш фериту та цементиту. Разом із підвищенням міцності дещо зменшується пластичність матеріалу. Перлітний високоміцний чавун широко використовується для виготовлення деталей, які працюють в умовах інтенсивного зношування.

Проміжне положення займає феритно-перлітна структура, яка поєднує переваги двох попередніх типів металевої основи. Саме така структура часто формується у литому стані та забезпечує задовільний комплекс механічних властивостей без додаткової термічної обробки.

Типові значення механічних властивостей високоміцного чавуну залежно від структури металевої основи наведено в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Вплив структури металевої основи на властивості високоміцного чавуну

Структура основи	Твердість НВ	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %
Феритна	140–190	400–500	12–18
Феритно-перлітна	180–260	500–700	5–12
Перлітна	240–320	700–900	2–5

З аналізу даних таблиці 1.2 видно, що зі збільшенням частки перліту в структурі зростають твердість та міцність матеріалу, проте зменшуються показники пластичності. Тому вибір структури металевої основи залежить від умов роботи конкретної деталі та вимог до її експлуатаційних характеристик.

Важливим фактором, який визначає властивості високоміцного чавуну, є не лише тип металевої основи, але й кількість, форма та розміри графітових включень. Найбільш сприятливими вважаються дрібні рівномірно розподілені графітові включення правильної сферичної форми. Зі збільшенням розмірів графітових частинок або погіршенням їх сферичності спостерігається зниження механічних властивостей матеріалу.

Для подальшого підвищення міцності, твердості та зносостійкості високоміцного чавуну застосовують різні види термічної обробки. Особливий інтерес становить ізотермічне гартування, під час якого у металевій основі формуються нові структурні складові, що забезпечують значне покращення комплексу механічних властивостей. Саме особливості цього процесу та механізми структуроутворення розглянуто в наступному підрозділі.

Поряд із механічними властивостями важливе значення для практичного використання високоміцного чавуну мають його технологічні характеристики. Саме вони визначають можливість виготовлення складних за формою виливків, економічність виробництва та ефективність подальшої механічної обробки деталей.

Високоміцний чавун з кулястим графітом характеризується добрими ливарними властивостями, що дозволяє отримувати виливки складної конфігурації з мінімальними витратами металу. Разом із тим технологія його виробництва є складнішою порівняно зі звичайними сірими чавунами, оскільки

потребує проведення спеціального модифікування розплаву для формування графіту кулястої форми.

Однією з важливих переваг високоміцного чавуну є підвищена зносостійкість. Завдяки наявності графітових включень у структурі матеріалу зменшується коефіцієнт тертя між контактуючими поверхнями. Графіт частково виконує функцію твердого мастильного матеріалу, що позитивно впливає на довговічність деталей, які працюють в умовах тертя та інтенсивного зношування.

Виробництво високоміцного чавуну потребує більш ретельного контролю хімічного складу та технологічних параметрів плавлення. Особливе значення має процес сфероїдизуючого модифікування, від якого залежить форма графітових включень і, відповідно, рівень механічних властивостей готового матеріалу. Порушення режимів модифікування може призвести до появи дефектів структури та зниження якості виливків.

У разі застосування подальшої термічної обробки технологія виготовлення деталей додатково ускладнюється, проте це дозволяє суттєво підвищити експлуатаційні характеристики матеріалу. Саме тому сучасні технології виробництва високоміцних чавунів поєднують удосконалені методи модифікування та раціональні режими термічної обробки.

До важливих технологічних переваг високоміцного чавуну також належить добра оброблюваність різанням. Наявність графіту в структурі сприяє зменшенню сил різання та зносу інструменту, що позитивно впливає на продуктивність механічної обробки та якість обробленої поверхні.

Завдяки поєднанню високих механічних характеристик, зносостійкості, добрих ливарних властивостей та задовільної оброблюваності різанням високоміцний чавун залишається одним із найбільш перспективних матеріалів для виготовлення відповідальних деталей машинобудівного призначення.

1.3 Ізотермічне гартування високоміцного чавуну та його вплив на структуру і властивості

1.3.1 Сутність процесу ізотермічного гартування.

Одним із найбільш ефективних способів підвищення механічних та експлуатаційних властивостей високоміцного чавуну є застосування ізотермічного гартування. Даний вид термічної обробки дозволяє отримати сприятливу структуру металевої основи, яка забезпечує високий рівень міцності, твердості, зносостійкості та ударної в'язкості. Завдяки цьому високоміцний чавун після ізотермічного гартування широко використовується для виготовлення відповідальних деталей машин, що працюють в умовах значних механічних навантажень.

Сутність ізотермічного гартування полягає у нагріванні чавуну до температур аустенітного стану, витримці при цій температурі з метою повного аустенітизування металевої основи та подальшому швидкому охолодженні до температури ізотермічної витримки. Після витримки протягом певного часу вироби охолоджують до кімнатної температури на повітрі. Схему ізотермічного гартування високоміцного чавуну наведено на рис. 1.3.

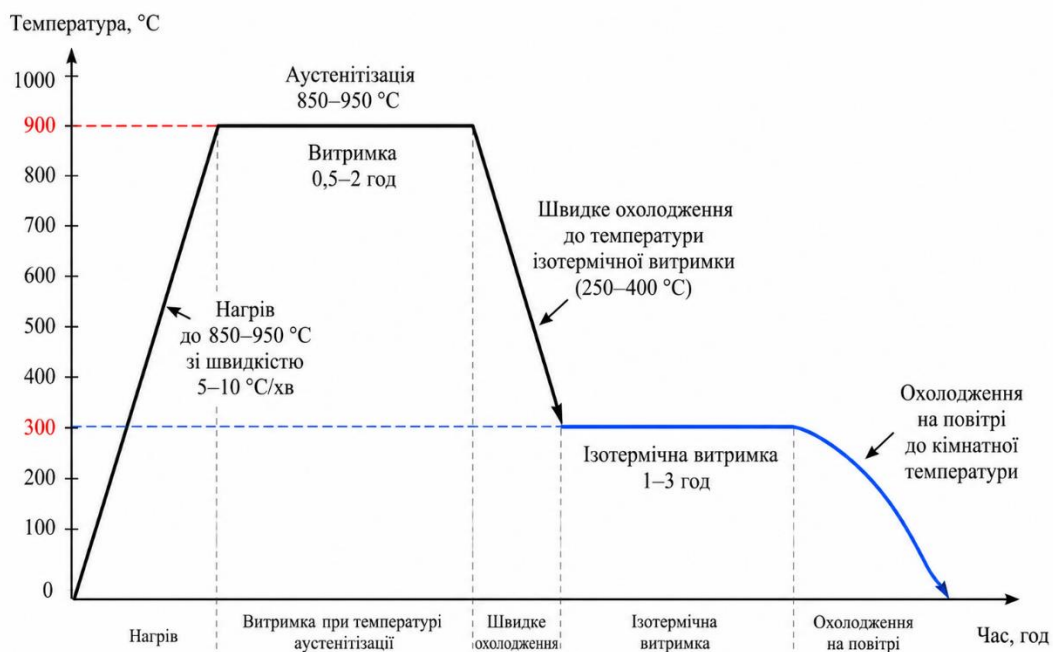


Рисунок 1.3 – Принципова схема режиму ізотермічного гартування високоміцного чавуну

Процес термічної обробки зазвичай включає три основні етапи:

- нагрівання до температури аустенітизації;
- ізотермічну витримку;
- остаточне охолодження до кімнатної температури.

На стадії аустенітизації чавун нагрівають до температури 850–950 °С. У результаті відбувається формування однорідної аустенітної структури, насиченої вуглецем. Тривалість витримки залежить від розмірів деталі, хімічного складу матеріалу та вимог до кінцевих властивостей виробу.

Після завершення аустенітизації заготовки швидко переносять у середовище ізотермічної витримки, температура якого зазвичай знаходиться в межах від 250 до 400 °С. На цьому етапі відбуваються основні процеси структуроутворення, які визначають майбутні властивості матеріалу.

Під час ізотермічної витримки аустеніт поступово розпадається з утворенням голчастого фериту та високовуглецевого залишкового аустеніту. Сформована структура характеризується високою дисперсністю та забезпечує покращений комплекс механічних властивостей у порівнянні з литим станом.

Тривалість ізотермічної витримки зазвичай становить від 1 до 3 годин. Недостатня тривалість витримки може призвести до неповного завершення структурних перетворень, тоді як надмірна витримка сприяє появі небажаних структурних складових та зниженню ефективності термічної обробки.

На формування структури після ізотермічного гартування найбільший вплив мають:

- температура аустенітизації;
- тривалість аустенітизації;
- температура ізотермічної витримки;
- тривалість ізотермічної витримки;
- хімічний склад чавуну.

Серед наведених параметрів особливе значення має температура ізотермічної витримки. Саме вона визначає швидкість перебігу фазових перетворень, морфологію структурних складових та співвідношення між феритом і залишковим аустенітом.

За нижчих температур ізотермічного гартування (250–300 °С) формується більш дисперсна структура, яка характеризується високою твердістю та міцністю. Разом із тим пластичність і ударна в'язкість матеріалу можуть дещо знижуватися.

Підвищення температури ізотермічної витримки до 340–380 °С сприяє збільшенню кількості залишкового аустеніту в структурі. У цьому випадку зростають пластичність та ударна в'язкість, однак твердість і міцність дещо зменшуються.

1.3.2 Формування структури при ізотермічному гартуванні.

Температура ізотермічного гартування є одним із найбільш важливих параметрів термічної обробки високоміцного чавуну. Саме вона визначає характер фазових перетворень, що відбуваються в аустеніті під час ізотермічної витримки, та безпосередньо впливає на структуру і механічні властивості матеріалу.

У процесі ізотермічного гартування аустеніт поступово розпадається з утворенням феритної складової та залишкового аустеніту. Особливості формування цих структурних компонентів значною мірою залежать від температури ізотермічної витримки. При цьому зміна температури дозволяє цілеспрямовано керувати співвідношенням структурних складових і, відповідно, експлуатаційними характеристиками матеріалу.

За низьких температур ізотермічного гартування, у межах 250–300 °С, швидкість дифузійних процесів є відносно невисокою. У результаті формується дрібнодисперсна структура з високою щільністю міжфазних границь. Така структура забезпечує підвищені показники твердості та міцності. Разом із тим пластичність і ударна в'язкість матеріалу дещо знижуються через підвищений опір пластичній деформації.

Підвищення температури ізотермічної витримки до 320–360 °С супроводжується зростанням швидкості фазових перетворень та збільшенням кількості залишкового аустеніту в структурі. У цьому випадку спостерігається більш збалансоване поєднання міцності та пластичності. Саме цей

температурний інтервал часто розглядається як найбільш перспективний для отримання комплексу механічних властивостей, необхідних для роботи деталей в умовах змінних навантажень.

За температур ізотермічного гартування 380–400 °С структура стає менш дисперсною, а частка залишкового аустеніту збільшується. Це позитивно впливає на пластичність та ударну в'язкість матеріалу, проте супроводжується певним зниженням твердості й міцності. Тому вибір високих температур ізотермічної витримки доцільний для деталей, які працюють в умовах динамічних та ударних навантажень.

Схематично вплив температури ізотермічного гартування на формування структури високоміцного чавуну наведено на рис. 1.4.

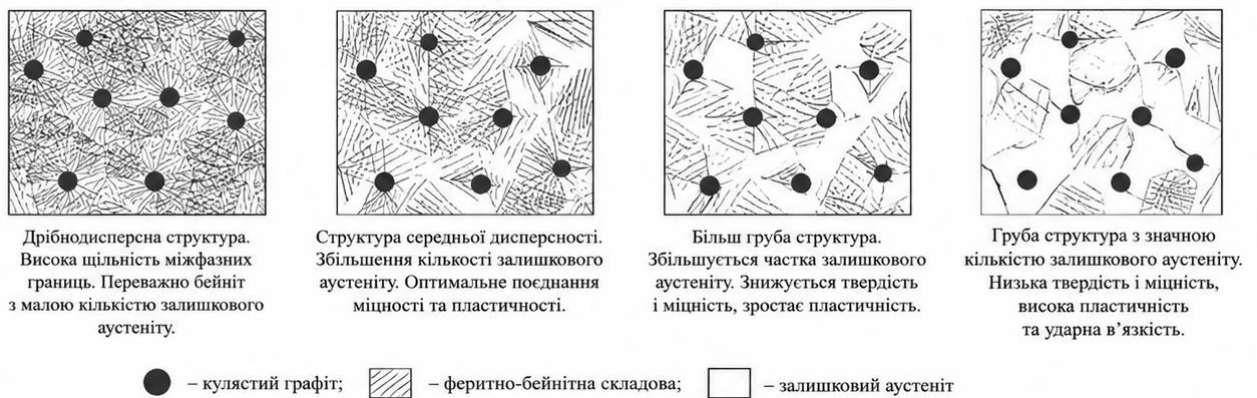


Рисунок 1.4 – Схематичний вплив температури ізотермічного гартування на формування структури високоміцного чавуну

Як видно з рис. 1.4, температура ізотермічного гартування істотно впливає на структуру високоміцного чавуну. За нижчих температур ізотермічної витримки формується дрібнодисперсна феритно-бейнітна структура з високою щільністю міжфазних меж та незначною кількістю залишкового аустеніту. Така структура забезпечує підвищені показники твердості та міцності матеріалу.

Підвищення температури ізотермічного гартування супроводжується збільшенням частки залишкового аустеніту та зменшенням дисперсності феритно-бейнітної складової. У результаті структура стає більш грубою, що сприяє підвищенню пластичності та ударної в'язкості, проте призводить до певного зниження твердості та міцності.

Таким чином, зміна температури ізотермічної витримки дозволяє цілеспрямовано керувати співвідношенням структурних складових високоміцного чавуну та отримувати необхідний комплекс механічних властивостей залежно від умов експлуатації виробів.

1.3.3 Вплив температури ізотермічного гартування на механічні властивості

Механічні властивості матеріалів, у тому числі й чавунів, характеризуються такими показниками, як межа міцності при розтягу (σ_B), межа текучості (σ_T), відносне подовження (δ), ударна в'язкість (КСУ) та твердість (НВ). Ці характеристики належать до основних механічних властивостей і регламентуються відповідними стандартами. Крім зазначених показників, для оцінювання працездатності матеріалів використовують також міцність при стиску, згині, крученні, зрізі, межу витривалості та інші характеристики, що визначають поведінку матеріалу в різних умовах експлуатації.

Високоміцні чавуни з кулястим графітом характеризуються широким діапазоном механічних властивостей, що обумовлено особливостями їх мікроструктури. Властивості таких чавунів значною мірою залежать від структури металевої основи, яка формується в процесі кристалізації та подальшої термічної обробки. Залежно від режимів ізотермічного гартування можливо отримати структури з різним співвідношенням феритної складової та залишкового аустеніту, що безпосередньо впливає на твердість, міцність, пластичність та ударну в'язкість матеріалу.

За нижчих температур ізотермічного гартування формується більш дисперсна структура металевої матриці, що забезпечує високі показники твердості та міцності. Підвищення температури ізотермічної витримки сприяє збільшенню частки залишкового аустеніту та зниженню дисперсності структурних складових, унаслідок чого зростають пластичність і ударна в'язкість, проте дещо зменшуються твердість та міцність.

Високий рівень механічних властивостей високоміцних чавунів пояснюється не лише особливостями структури металевої основи, а й кулястою

формою графітових включень. На відміну від пластинчастого графіту, характерного для сірих чавунів, кулястий графіт значно менше концентрує напруження в матеріалі, що сприяє підвищенню опору руйнуванню. Крім того, ізотермічне гартування забезпечує формування структури з мінімальним рівнем внутрішніх напружень, що позитивно впливає на комплекс механічних властивостей матеріалу.

Типові значення механічних властивостей високоміцних чавунів після ізотермічного гартування наведено в табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Орієнтовний вплив температури ізотермічного гартування на механічні властивості високоміцного чавуну

Температура, °С	Твердість НВ	Міцність, МПа	Подовження, %
280	430–450	1400–1600	1–2
320	390–420	1200–1400	3–5
360	340–380	1000–1200	6–8
380	300–340	850–1000	8–10

Загальну тенденцію зміни механічних властивостей залежно від температури ізотермічного гартування схематично показано на рис. 1.5.

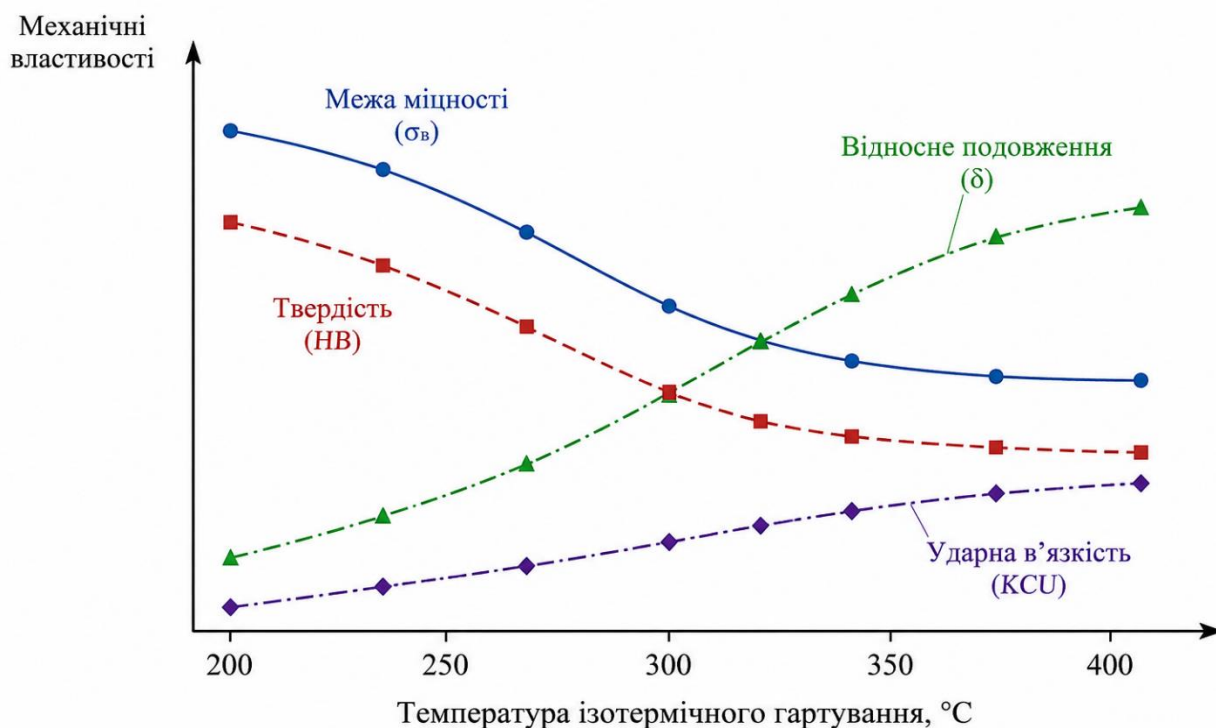


Рисунок 1.5 – Узагальнена схема впливу температури ізотермічного гартування на механічні властивості високоміцного чавуну

Таким чином, ізотермічне гартування є ефективним способом керування структурою та властивостями високоміцного чавуну. Зміна параметрів термічної обробки дозволяє отримувати різні поєднання міцності, твердості та пластичності залежно від вимог до конкретного виробу. Найбільш важливим параметром процесу є температура ізотермічної витримки, яка безпосередньо впливає на формування структури металевої основи та експлуатаційні характеристики матеріалу.

Саме тому дослідження впливу температури ізотермічного гартування на структуру та властивості високоміцного чавуну є важливим завданням як з наукової, так і з практичної точки зору.

Аналіз результатів досліджень, наведених у науково-технічній літературі, свідчить про те, що оптимальна температура ізотермічного гартування визначається умовами експлуатації виробу. Для деталей, які працюють в умовах інтенсивного зношування, перевагу надають нижчим температурам ізотермічної витримки. Якщо ж пріоритетом є забезпечення достатньої пластичності та опору ударним навантаженням, доцільно використовувати вищі температури обробки.

Таким чином, температура ізотермічного гартування є одним із ключових факторів, що визначають структуру та властивості високоміцного чавуну. Рациональний вибір температурного режиму дозволяє отримати необхідне поєднання міцності, твердості, пластичності та ударної в'язкості залежно від умов експлуатації виробів. Саме тому дослідження впливу температури ізотермічного гартування на властивості високоміцного чавуну має важливе практичне значення та є предметом подальшого розгляду в даній роботі.

Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз літературних джерел, присвячених структурі, властивостям та особливостям термічної обробки високоміцного чавуну з кулястим графітом.

Встановлено, що високоміцний чавун є одним із найбільш перспективних конструкційних матеріалів сучасного машинобудування завдяки поєднанню високої міцності, достатньої пластичності, доброї зносостійкості та

технологічності. Визначено, що механічні властивості чавуну значною мірою залежать від форми, розмірів і характеру розподілу графітових включень, а також від структури металевої основи.

Розглянуто особливості структури високоміцного чавуну з кулястим графітом. Показано, що залежно від умов кристалізації, хімічного складу та термічної обробки металева основа може мати феритну, феритно-перлітну або перлітну структуру, які забезпечують різне поєднання механічних властивостей матеріалу.

Проаналізовано процес ізотермічного гартування високоміцного чавуну та встановлено, що даний вид термічної обробки є ефективним способом підвищення експлуатаційних характеристик матеріалу. Внаслідок ізотермічної витримки відбувається формування структури, яка забезпечує високий рівень міцності, твердості та зносостійкості при збереженні достатньої пластичності.

На підставі аналізу науково-технічної літератури встановлено, що температура ізотермічного гартування є одним із визначальних факторів формування структури та властивостей високоміцного чавуну. Зниження температури ізотермічної витримки сприяє підвищенню твердості та міцності матеріалу, тоді як її підвищення забезпечує збільшення пластичності та ударної в'язкості.

Проведений аналіз підтвердив доцільність дослідження впливу температури ізотермічного гартування на структуру та властивості високоміцного чавуну, що визначило напрямок подальших досліджень, викладених у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Матеріал дослідження

Об'єктом дослідження у даній роботі був легований високоміцний чавун з кулястим графітом, який широко використовується для виготовлення відповідальних деталей машин і механізмів, що працюють в умовах підвищених механічних навантажень та інтенсивного зношування. До таких деталей належать зубчасті колеса, колінчасті вали, маточини, елементи трансмісії, корпусні деталі та інші вироби машинобудівного призначення.

Високоміцний чавун з кулястим графітом поєднує добрі ливарні властивості з високими показниками міцності, пластичності та зносостійкості. Додаткове легування та подальша термічна обробка дозволяють суттєво покращити його експлуатаційні характеристики, що робить даний матеріал перспективним для використання в сучасному машинобудуванні.

Для проведення досліджень використовували легований високоміцний чавун з кулястим графітом, хімічний склад якого наведено в табл. 2.1. До складу сплаву входять легувальні елементи, які забезпечують формування необхідної структури під час ізотермічного гартування та сприяють підвищенню механічних властивостей матеріалу.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад досліджуваного високоміцного чавуну

Елемент	C	Si	Mn	Cr	Cu	Ni	Mo	P	S
Вміст, %	3,3	1,5	0,25	0,02	0,3	0,4	0,18	0,02	≤0,02

Вуглець є основним компонентом чавуну та визначає можливість утворення графітових включень. Кремній сприяє процесам графітизації та покращує ливарні властивості сплаву. Марганець і хром впливають на формування структури металевої основи та підвищують її міцність.

Мідь, нікель та молібден використовуються як легувальні елементи для покращення прокалюваності та забезпечення формування сприятливої

структури під час ізотермічного гартування. Наявність цих елементів дозволяє отримати високий комплекс механічних властивостей після термічної обробки.

Фосфор і сірка належать до шкідливих домішок, тому їх вміст у досліджуваному матеріалі підтримувався на мінімальному рівні. Це забезпечує покращення механічних характеристик та зменшує ймовірність утворення дефектів структури.

Матеріал для досліджень було отримано у вигляді литих заготовок із кулястою формою графіту. Із заготовок виготовлялися зразки для проведення металографічних досліджень та визначення механічних властивостей після ізотермічного гартування. Загальний вигляд дослідних зразків наведено на рис. 2.1.

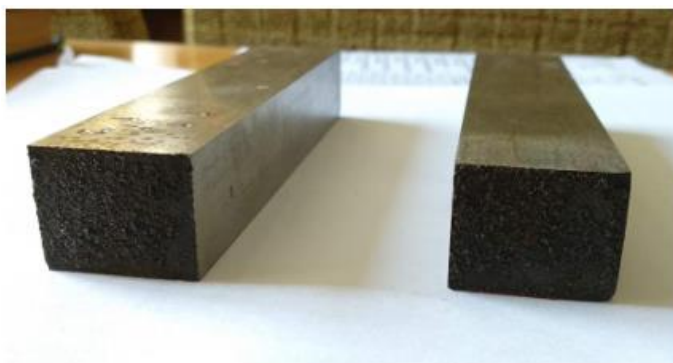


Рисунок 2.1 – Зразки для проведення металографічних та механічних випробувань

Для забезпечення достовірності результатів усі дослідні зразки були виготовлені з однієї плавки та мали однакові геометричні розміри. Подальші дослідження проводилися після термічної обробки за різних температур ізотермічної витримки, що дозволило оцінити вплив температури ізотермічного гартування на структуру та властивості високоміцного чавуну.

2.2 Методика проведення ізотермічного гартування дослідних зразків

З метою дослідження впливу температури ізотермічного гартування на структуру та властивості високоміцного чавуну було проведено термічну обробку дослідних зразків за різних режимів ізотермічної витримки.

Ізотермічне гартування є одним із найбільш ефективних способів підвищення механічних властивостей високоміцних чавунів з кулястим графітом. Суть процесу полягає у нагріванні матеріалу до температури аустенізації з подальшим швидким охолодженням до температури ізотермічної витримки та витримуванням протягом визначеного часу для завершення структурних перетворень.

Перед проведенням ізотермічного гартування всі зразки проходили однакову підготовку. Термічну обробку здійснювали у камерній електричній печі лабораторного типу, яка забезпечувала рівномірне нагрівання та підтримання заданої температури в робочому просторі. Загальний вигляд печі, що використовувалася для проведення термічної обробки, наведено на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Камерна електрична піч для проведення термічної обробки дослідних зразків

Контроль температури здійснювали за допомогою термопар та цифрового вимірювального приладу. На першому етапі зразки нагрівали до температури аустенізації 900 °C. За цієї температури здійснювали витримку протягом 60 хвилин для отримання однорідної аустенітної структури та вирівнювання концентрації вуглецю в металевій основі.

Після завершення аустенізації зразки швидко переносили до олов'яної ванни з температурою, що відповідала обраному режиму ізотермічного гартування. Ізотермічну витримку проводили за чотирьох температурних режимів: 280 °C, 310 °C, та 350 °C. Тривалість витримки для всіх дослідних груп становила 150 хвилин.

Вибір зазначених температур обумовлений необхідністю дослідження процесів структуроутворення в широкому інтервалі температур ізотермічного гартування. Нижні температури витримки сприяють формуванню більш дисперсної структури з підвищеними показниками твердості та міцності, тоді як вищі температури забезпечують збільшення пластичності та ударної в'язкості матеріалу.

Після завершення ізотермічної витримки зразки охолоджували на спокійному повітрі до кімнатної температури. Такий режим охолодження забезпечував стабілізацію сформованої структури та виключав додаткові фазові перетворення. Схему термічної обробки дослідних зразків наведено на рис. 2.3.

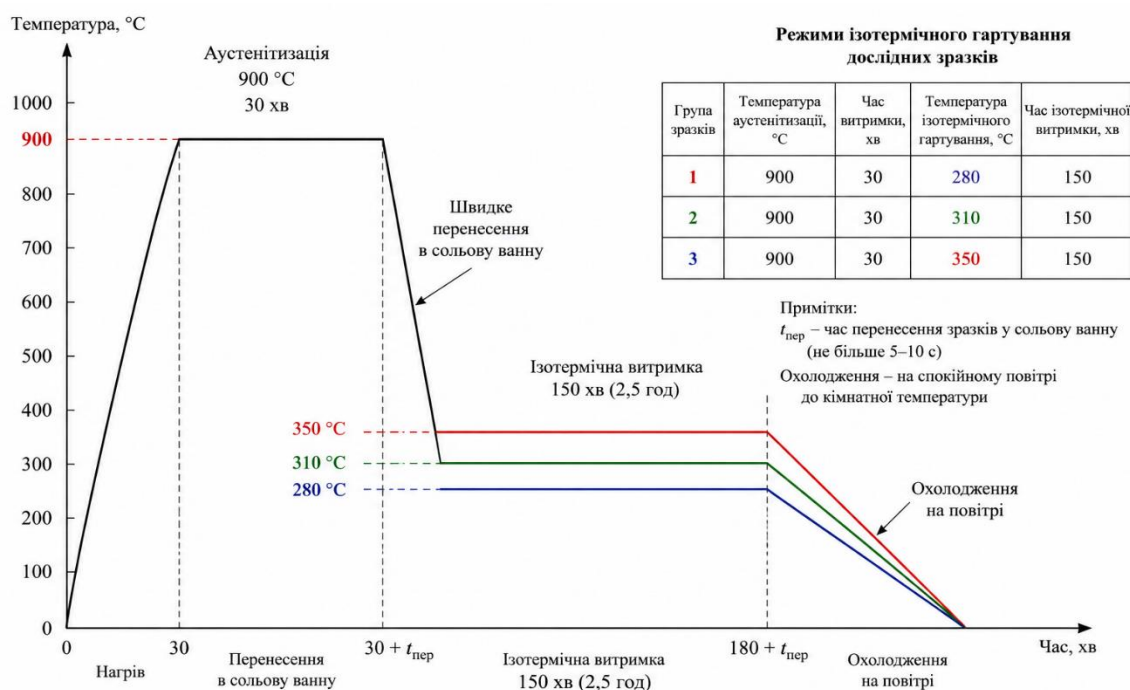


Рисунок 2.3 – Режими ізотермічного гартування дослідних зразків

Для зручності аналізу результатів досліджень зразки було розподілено на чотири групи відповідно до температури ізотермічної витримки. Позначення дослідних груп наведено в табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Режими ізотермічного гартування дослідних зразків

Група зразків	Температура аустенізації, °C	Час витримки, хв	Температура ізотермічного гартування, °C	Час ізотермічної витримки, хв
1	900	30	280	150
2	900	30	310	150

3	900	30	350	150
---	-----	----	-----	-----

Застосування різних температур ізотермічного гартування дозволило оцінити їх вплив на формування структури високоміцного чавуну та встановити взаємозв'язок між параметрами термічної обробки і комплексом механічних властивостей досліджуваного матеріалу.

2.3 Методика металографічних досліджень структури високоміцного чавуну

Металографічні дослідження проводили з метою вивчення впливу температури ізотермічного гартування на особливості формування структури високоміцного чавуну з кулястим графітом. Аналіз мікроструктури дозволяє оцінити характер розподілу графітових включень, будову металевої основи та структурні зміни, що відбуваються внаслідок термічної обробки.

Для проведення досліджень із дослідних зразків вирізали металографічні темплети, які піддавали механічній підготовці. Підготовка включала послідовне шліфування на абразивних шкурках різної зернистості з поступовим зменшенням розміру абразиву. Після шліфування поверхню зразків полірували до отримання дзеркального блиску.

Для виявлення мікроструктури підготовлені шліфи піддавали хімічному травленню 4 %-м спиртовим розчином азотної кислоти (ніталем). Після травлення зразки промивали етиловим спиртом та висушували на повітрі.

Спостереження за структурою проводили за допомогою оптичного металографічного мікроскопа при збільшеннях від $\times 100$ до $\times 500$. Загальний вигляд обладнання, що використовувалося для дослідження мікроструктури, наведено на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Загальний вид оптичного металографічного мікроскопу

У процесі дослідження оцінювали форму, розміри та характер розподілу графітових включень, а також особливості будови металевої основи після ізотермічного гартування за різних температур. Особливу увагу приділяли змінам дисперсності структури та характеру структурних складових, які формувалися в результаті термічної обробки.

Для кожного режиму ізотермічного гартування досліджували не менше трьох шліфів. Це дозволило підвищити достовірність отриманих результатів та забезпечити об'єктивну оцінку структурних змін у досліджуваному матеріалі.

Отримані мікроструктури фотографували за допомогою цифрової камери, інтегрованої з мікроскопом. Надалі мікрофотографії використовували для аналізу впливу температури ізотермічного гартування на структуру високоміцного чавуну та порівняння результатів, отриманих для різних режимів термічної обробки.

2.3.1 Фрактографічний аналіз поверхні руйнування

Фрактографічний аналіз є ефективним методом дослідження механізмів руйнування металевих матеріалів, який дозволяє встановити особливості зародження та розвитку тріщин, а також оцінити характер руйнування досліджуваного матеріалу. Дослідження морфології поверхні зламу дає можливість визначити взаємозв'язок між структурним станом матеріалу та його механічними властивостями.

Для проведення фрактографічних досліджень використовували поверхні руйнування зразків, отримані після випробувань на розтяг. Аналіз виконували за

допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106 (рис. 2.6), який забезпечує отримання детальних зображень поверхні зразків з високою роздільною здатністю та значною глибиною різкості.



Рисунок 2.6 – Растровий електронний мікроскоп РЕМ-106

Принцип роботи растрового електронного мікроскопа ґрунтується на скануванні поверхні досліджуваного об'єкта сфокусованим електронним пучком. У результаті взаємодії електронів із матеріалом виникають вторинні та відбиті електрони, сигнали яких використовуються для формування зображення поверхні. Отримані зображення дозволяють досліджувати особливості мікрорельєфу поверхні руйнування, характер розподілу графітових включень та морфологію окремих елементів структури.

Фрактографічний аналіз проводили при різних збільшеннях з метою виявлення характерних ознак руйнування, оцінювання особливостей поширення тріщини та встановлення впливу структури металевої матриці на механізм руйнування високоміцного чавуну. Результати досліджень використовували для подальшого аналізу впливу температури ізотермічного гартування на характер руйнування досліджуваного матеріалу.

2.4 Методика визначення механічних властивостей високоміцного чавуну

2.4.1 Визначення твердості

Твердість є однією з найважливіших характеристик конструкційних матеріалів і визначає їх здатність чинити опір проникненню більш твердого тіла в поверхневий шар. Для високоміцних чавунів твердість є важливим показником, який характеризує опір пластичній деформації, зносостійкість та значною мірою пов'язаний із структурним станом металевої основи.

Відомо, що після ізотермічного гартування структура високоміцного чавуну зазнає суттєвих змін залежно від температури ізотермічної витримки. Зміна співвідношення структурних складових безпосередньо впливає на твердість матеріалу. Саме тому визначення твердості було одним із основних методів оцінювання ефективності проведеної термічної обробки.

Вимірювання твердості проводили за методом Брінелля відповідно до вимог чинних стандартів. Даний метод є одним із найбільш поширених способів контролю властивостей чавунів і дозволяє отримати достовірні результати при дослідженні матеріалів із неоднорідною структурою та наявністю графітових включень.

Суть методу полягає у втискуванні загартованої кульки визначеного діаметра в поверхню дослідного зразка під дією заданого навантаження протягом певного часу. Після зняття навантаження вимірюють діаметр утвореного відбитка, за яким розраховують твердість матеріалу в одиницях Брінелля (НВ).

Випробування проводили на стаціонарному твердомірі Брінелля. Загальний вигляд обладнання наведено на рис. 2.6.



Рисунок 2.6 – Твердомір для визначення твердості за методом Брінелля

Перед проведенням випробувань поверхню зразків піддавали шліфуванню та очищенню від забруднень для забезпечення необхідної точності вимірювань. Відбитки наносили на достатній відстані один від одного та від країв зразка, що дозволяло уникнути взаємного впливу пластичних деформацій у зоні випробування.

Для кожного режиму ізотермічного гартування виконували не менше трьох вимірювань у різних точках поверхні зразка. Остаточне значення твердості визначали як середнє арифметичне результатів вимірювань. Такий підхід дозволяв зменшити вплив локальної структурної неоднорідності матеріалу на результати дослідження.

Отримані значення твердості використовували для аналізу впливу температури ізотермічного гартування на властивості високоміцного чавуну. Порівняння результатів для різних температурних режимів дозволило встановити закономірності зміни твердості залежно від особливостей сформованої структури та визначити найбільш раціональні режими термічної обробки.

Результати вимірювань твердості були використані під час подальшого аналізу структури та механічних властивостей досліджуваного матеріалу, а

також для побудови відповідних графічних залежностей, наведених у третьому розділі роботи.

2.4.2 Визначення міцності та пластичності

Механічні властивості досліджуваного матеріалу визначали шляхом випробувань на статичний розтяг. Випробування проводили на універсальній випробувальній машині, яка забезпечувала плавне прикладання навантаження до моменту руйнування зразка. Загальний вигляд випробувального обладнання наведено на рис. 2.7.



Рисунок 2.7 – Універсальна випробувальна машина для випробувань на розтяг

Під час випробувань визначали межу міцності при розтягу та відносне подовження після руйнування зразків. Межу міцності розраховували як відношення максимального навантаження, яке витримував зразок до моменту руйнування, до початкової площі його поперечного перерізу:

$$\sigma_B = \frac{P_{max}}{F_0}.$$

R_{\max} – максимальне навантаження, Н; F_0 – початкова площа поперечного перерізу зразка, мм².

Відносне подовження визначали за формулою:

$$\delta = \frac{l - l_0}{l_0} \cdot 100\% .$$

де l_0 – початкова довжина зразка; l – довжина зразка після випробування.

Для кожного режиму ізотермічного гартування випробовували не менше трьох зразків, після чого визначали середні значення досліджуваних характеристик.

2.4.3 Визначення ударної в'язкості.

Для оцінки опору матеріалу ударному руйнуванню проводили визначення ударної в'язкості методом Шарпі. Випробування здійснювали на маятниковому копрі. Загальний вигляд обладнання наведено на рис. 2.8.



Рисунок 2.8 – Маятниковий копр для визначення ударної в'язкості.

Ударна в'язкість характеризує здатність матеріалу поглинати енергію ударного навантаження до моменту руйнування. Значення ударної в'язкості визначали як відношення роботи руйнування зразка до площі його поперечного перерізу:

$$KCU = \frac{W}{F} .$$

де W – робота, витрачена на руйнування зразка, Дж; F – площа поперечного перерізу зразка, m^2 .

Для кожного режиму ізотермічного гартування випробовували не менше трьох зразків. Отримані результати усереднювали та використовували для подальшого аналізу впливу температури ізотермічного гартування на механічні властивості високоміцного чавуну.

Висновки до розділу 2

1. Обґрунтовано вибір високоміцного чавуну з кулястим графітом як матеріалу дослідження, що характеризується високим комплексом механічних властивостей та широко використовується для виготовлення відповідальних деталей машин і механізмів.

2. Розроблено програму експериментальних досліджень, яка передбачала проведення ізотермічного гартування зразків за різних температур ізотермічної витримки для оцінювання їх впливу на структуру та властивості матеріалу.

3. Термічну обробку дослідних зразків здійснювали шляхом аустенітизації за температури $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ з витримкою 30 хвилин та подальшого ізотермічного гартування за температур $280\text{ }^{\circ}\text{C}$, $310\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ з витримкою 180 хвилин.

4. Для дослідження структурного стану матеріалу після термічної обробки передбачено проведення металографічних досліджень із використанням оптичної мікроскопії та фрактографічного аналізу поверхонь руйнування за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ-106.

5. Для оцінювання впливу температури ізотермічного гартування на властивості високоміцного чавуну використано комплекс механічних випробувань, який включав визначення твердості за методом Брінелля, випробування на розтяг та визначення ударної в'язкості.

6. Обрана методика досліджень забезпечує можливість комплексного аналізу впливу температури ізотермічного гартування на структуру, твердість та механічні властивості високоміцного чавуну, а також дозволяє визначити раціональний режим термічної обробки.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ЇХ АНАЛІЗ

3.1 Вплив температури ізотермічного гартування на структуру високоміцного чавуну

Для встановлення впливу температури ізотермічного гартування на структурний стан високоміцного чавуну було проведено металографічні дослідження зразків після термічної обробки за температур 280 °С, 310 °С та 350 °С. Аналіз мікроструктури здійснювали за допомогою оптичного металографічного мікроскопа після підготовки та травлення шліфів відповідно до методики, наведеної в розділі 2.

Результати досліджень показали, що температура ізотермічної витримки суттєво впливає на характер формування структури металевої основи високоміцного чавуну. При цьому форма та розподіл графітових включень практично не змінювалися, оскільки визначаються умовами кристалізації та модифікування розплаву. Основні структурні зміни відбувалися в металевій основі матеріалу.

Мікроструктуру високоміцного чавуну після ізотермічного гартування за температури 280 °С наведено на рис. 3.1.

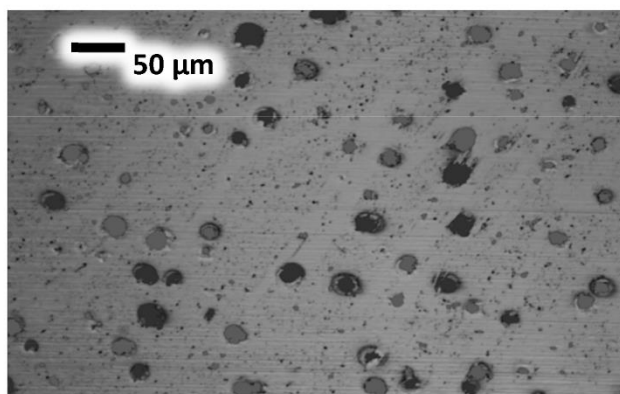


Рисунок 3.1 – Мікроструктура високоміцного чавуну після ізотермічного гартування за температури 280 °С

У структурі матеріалу спостерігаються рівномірно розподілені графітові включення кулястої форми, характерні для високоміцного чавуну. Графітові

включення мають переважно правильну сфероїдальну форму та рівномірно розташовані в об'ємі металевої матриці.

Металева основа характеризується дрібнодисперсною будовою, що є наслідком перебігу ізотермічного перетворення за відносно низької температури. Формування такої структури сприяє підвищенню опору пластичній деформації та забезпечує високі показники твердості й міцності матеріалу. Дрібні структурні складові рівномірно розподілені між графітовими включеннями, що свідчить про достатньо однорідний структурний стан після термічної обробки.

Отримана мікроструктура створює передумови для формування високих механічних властивостей високоміцного чавуну, що підтверджується результатами подальших випробувань на твердість та міцність.

Після ізотермічного гартування за температури 310 °С (рис. 3.2) структура металевої основи залишається достатньо дрібнодисперсною, проте спостерігається певне укрупнення окремих структурних складових. У порівнянні зі зразками, обробленими за температури 280 °С, структура стає більш рівномірною, що позитивно впливає на поєднання міцності та пластичності матеріалу.

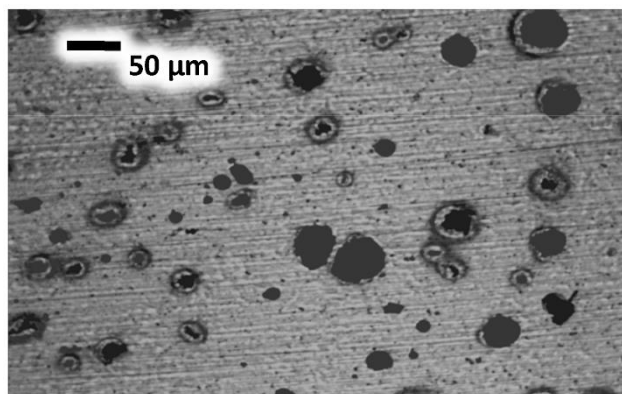


Рисунок 3.2 – Мікроструктура високоміцного чавуну після ізотермічного гартування за температури 310 °С

Мікроструктуру високоміцного чавуну після ізотермічного гартування за температури 310 °С наведено на рис. 3.2. У структурі матеріалу спостерігаються рівномірно розподілені графітові включення кулястої форми, характерні для

високоміцного чавуну. Графітові включення мають правильну сфероїдальну форму та рівномірно розташовані в металевій матриці.

Порівняно зі зразками, обробленими за температури 280 °С, структура характеризується дещо меншою дисперсністю та більш вираженим розвитком структурних складових металевої основи. Водночас структура залишається достатньо однорідною, а розподіл графітових включень не зазнає суттєвих змін.

Підвищення температури ізотермічного гартування до 310 °С сприяє формуванню структури, яка забезпечує раціональне поєднання міцності та пластичності. З одного боку, структура зберігає достатню дисперсність для забезпечення високих показників твердості та міцності, а з іншого — створює умови для підвищення ударної в'язкості та опору руйнуванню. Саме тому для даного режиму термічної обробки спостерігається найбільш збалансований комплекс механічних властивостей.

Подальше підвищення температури ізотермічного гартування до 350 °С призводить до помітного укрупнення структурних складових металевої основи (рис. 3.3). Структура стає менш дисперсною, збільшуються відстані між окремими структурними елементами. Такі зміни сприяють підвищенню пластичності матеріалу, однак супроводжуються зменшенням твердості та міцності.

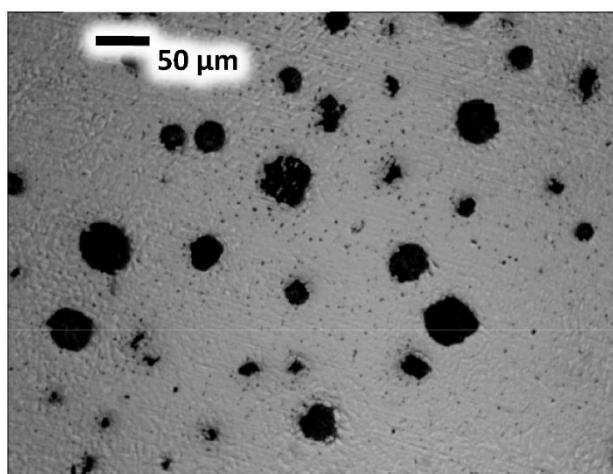


Рисунок 3.3 – Мікроструктура високоміцного чавуну після ізотермічного гартування за температури 350 °С

У структурі матеріалу спостерігаються графітові включення кулястої форми, рівномірно розподілені в металевій матриці. Форма графітових включень

залишається стабільною та відповідає характерним ознакам високоміцного чавуну.

Порівняно зі зразками, обробленими за температурами 280 °C та 310 °C, структура характеризується меншою дисперсністю та більш розвиненими структурними складовими металевої основи. Підвищення температури ізотермічного гартування сприяє укрупненню структурних елементів і зменшенню кількості міжфазних меж у металічній матриці.

Зниження дисперсності структури призводить до зменшення опору пластичній деформації, що супроводжується певним зниженням твердості та межі міцності матеріалу. Водночас формування більш грубої структури позитивно впливає на пластичність та ударну в'язкість високоміцного чавуну. Таким чином, ізотермічне гартування за температури 350 °C забезпечує отримання структури, орієнтованої на підвищення деформаційної здатності та опору крихкому руйнуванню.

Для більш детального аналізу особливостей руйнування матеріалу після механічних випробувань було проведено дослідження поверхонь зламу зразків. Типові фрактограми зразків після ізотермічного гартування за температур 280 °C, 310 °C та 350 °C наведені на рис. 3.4–3.6.

Аналіз поверхні руйнування зразка після ізотермічного гартування за температури 280 °C (рис. 3.4) показав наявність численних графітових включень кулястої форми, рівномірно розподілених у металевій основі.

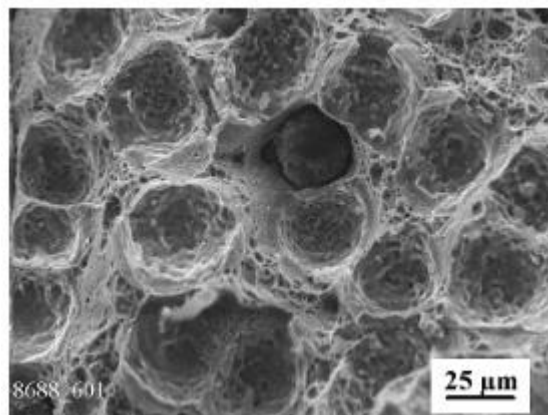


Рисунок 3.4 – Фрактографія поверхні руйнування високоміцного чавуну після ізотермічного гартування за температури 280 °C

Поверхня зламу характеризується дрібнорозвиненим рельєфом із великою кількістю локальних ділянок руйнування навколо графітових включень. Такий характер руйнування свідчить про високий рівень зміцнення металевої основи та добре узгоджується з максимальними значеннями твердості (435 НВ) і межі міцності (1320 МПа), отриманими для даного режиму термічної обробки. Разом із тим відносно невисока ударна в'язкість і пластичність вказують на обмежену здатність матеріалу до розвитку пластичної деформації перед руйнуванням.

Після ізотермічного гартування за температури 310 °С (рис. 3.5) спостерігається більш розвинений та неоднорідний рельєф поверхні руйнування.

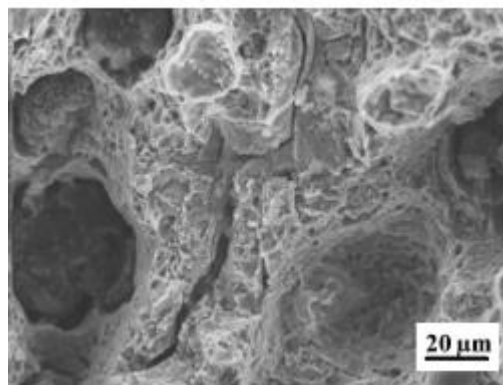


Рисунок 3.5 – Фрактографія поверхні руйнування високоміцного чавуну після ізотермічного гартування за температури 310 °С

Поряд із графітовими включеннями добре помітні ділянки локальної пластичної деформації металевої основи. У порівнянні зі зразками, обробленими за температури 280 °С, поверхня зламу має більш складну морфологію, що свідчить про підвищення здатності матеріалу до поглинання енергії навантаження. Саме для цього режиму були отримані найбільші значення ударної в'язкості (6,8 кг·м/см²) при збереженні високого рівня міцності (1250 МПа). Отримані результати дозволяють зробити висновок про формування найбільш збалансованого комплексу механічних властивостей.

Для зразків після ізотермічного гартування за температури 350 °С (рис. 3.6) характерним є подальша зміна морфології поверхні руйнування.

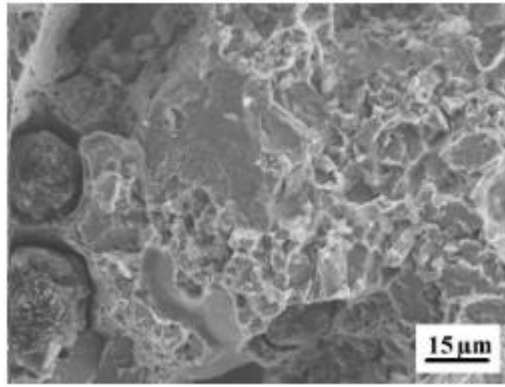


Рисунок 3.6 – Фрактографія поверхні руйнування високоміцного чавуну після ізотермічного гартування за температури 350 °С

На фрактограмах спостерігаються більш протяжні ділянки зі спрощеним рельєфом та окремі відносно гладкі області руйнування. При цьому кулясті графітові включення залишаються добре помітними. Зменшення кількості дрібних елементів рельєфу свідчить про зниження рівня зміцнення металевої основи порівняно зі зразками, обробленими за нижчих температур. Це підтверджується результатами механічних випробувань, відповідно до яких при температурі 350 °С спостерігається зниження твердості до 340 НВ та межі міцності до 1020 МПа. Водночас даний режим забезпечує найбільше відносне подовження (7,5 %), що свідчить про підвищення пластичності матеріалу.

Порівняльний аналіз фрактограм показує, що підвищення температури ізотермічного гартування суттєво впливає на характер руйнування високоміцного чавуну. Для температури 280 °С характерним є максимальний рівень зміцнення металевої основи та найвищі показники міцності. При температурі 350 °С спостерігається підвищення пластичності, однак одночасно зменшуються міцнісні характеристики матеріалу. Найбільш сприятливе поєднання особливостей поверхні руйнування та механічних властивостей отримано після ізотермічного гартування за температури 310 °С, що підтверджує доцільність вибору даного режиму як раціонального для досліджуваного високоміцного чавуну.

3.2 Вплив температури ізотермічного гартування на твердість високоміцного чавуну

Однією з основних характеристик конструкційних матеріалів є твердість, яка визначає їх здатність чинити опір пластичній деформації та значною мірою характеризує зносостійкість і міцність. Для високоміцного чавуну твердість суттєво залежить від структури металевої основи, яка формується в процесі термічної обробки. Тому дослідження впливу температури ізотермічного гартування на твердість дозволяє оцінити ефективність обраних режимів обробки та встановити взаємозв'язок між структурою і властивостями матеріалу. Результати визначення твердості високоміцного чавуну після ізотермічного гартування наведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вплив температури ізотермічного гартування на твердість високоміцного чавуну

Температура ізотермічного гартування, °С	Твердість, НВ
280	435
310	410
350	340

Для наочності отримані результати представлені графічно на рис. 3.7.

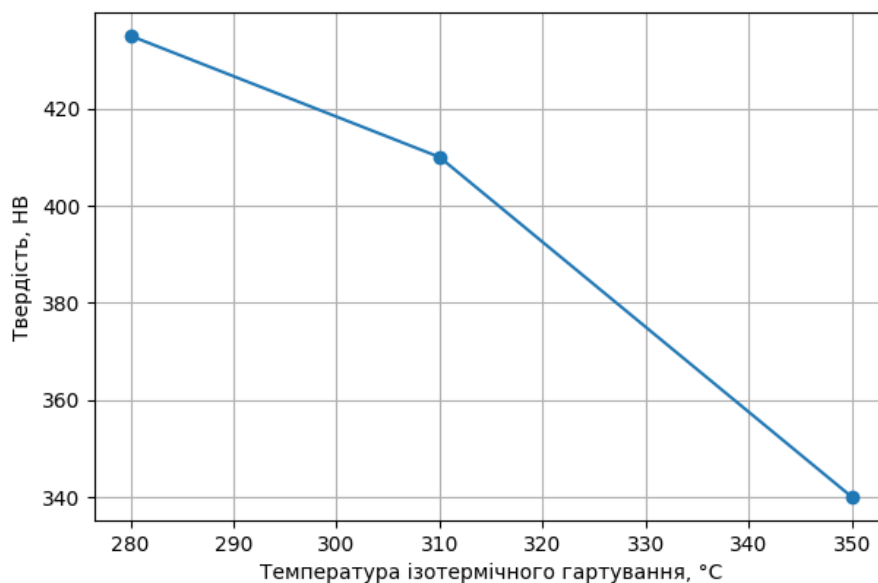


Рисунок 3.7 – Залежність твердості високоміцного чавуну від температури ізотермічного гартування

Зі збільшенням температури ізотермічного гартування від 280 до 350 °С спостерігається поступове зниження твердості високоміцного чавуну. Максимальне значення твердості (435 НВ) отримано після ізотермічного гартування за температури 280 °С, тоді як при 350 °С твердість зменшується до 340 НВ, що пов'язано зі зміною структури металевої основи та зменшенням її дисперсності.

Аналіз отриманих результатів показує, що температура ізотермічного гартування істотно впливає на твердість досліджуваного матеріалу. Найвище значення твердості спостерігається після ізотермічного гартування за температури 280 °С і становить 435 НВ. Отриманий результат свідчить про формування найбільш дисперсної структури металевої основи, яка забезпечує високий опір локальній пластичній деформації.

Підвищення температури ізотермічної витримки до 310 °С супроводжується зменшенням твердості до 410 НВ. Незважаючи на відносно незначне зниження показника, дана зміна свідчить про початок структурних перетворень, пов'язаних з укрупненням структурних складових металевої основи та зменшенням її дисперсності.

Подальше підвищення температури ізотермічного гартування до 350 °С призводить до більш помітного зниження твердості, яка становить 340 НВ. У порівнянні зі зразками, обробленими за температури 280 °С, твердість зменшується майже на 22 %. Така зміна узгоджується з результатами металографічних досліджень, наведеними в підрозділі 3.1, де було встановлено формування менш дисперсної структури при підвищенні температури ізотермічної витримки.

Отримані результати підтверджують, що зі збільшенням температури ізотермічного гартування відбувається поступове зниження твердості високоміцного чавуну. Це пояснюється зміною структурного стану металевої основи та зменшенням ступеня її дисперсності. Внаслідок цього матеріал стає

менш чутливим до локальної пластичної деформації, проте набуває більшої пластичності та здатності до поглинання енергії навантаження.

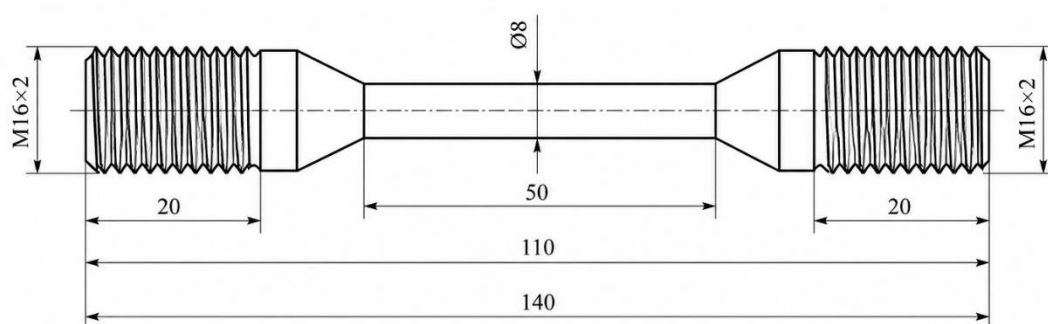
Таким чином, встановлено, що максимальні значення твердості забезпечуються після ізотермічного гартування за температури 280 °С. Підвищення температури ізотермічної витримки до 310 °С та 350 °С призводить до закономірного зниження твердості, що пов'язано зі зміною структури металевої основи високоміцного чавуну.

3.3 Вплив температури ізотермічного гартування на механічні властивості високоміцного чавуну

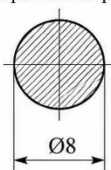
Для визначення механічних властивостей високоміцного чавуну після ізотермічного гартування були проведені випробування на розтяг. Дослідження виконували на стандартних циліндричних зразках, конструкція яких забезпечувала рівномірний розподіл напружень у робочій частині під час навантаження. За результатами випробувань визначали межу міцності при розтягу та відносне подовження матеріалу.

Зовнішній вигляд і геометричні параметри зразка для випробувань на розтяг наведено на рис. 3.8.

Зразок для випробувань на міцність при розриві



Поперечний переріз



Зразок після випробування

Матеріал: високоміцний чавун
Розміри вказані в міліметрах

Рисунок 3.8 – Зразок для випробувань на розтяг та характер його руйнування після навантаження

Як видно з рис. 3.8, руйнування зразка відбулося в робочій частині, що свідчить про коректність проведення випробувань та відсутність концентрації напружень у місцях закріплення. Характер зламу відповідає особливостям руйнування високоміцного чавуну з кулястим графітом і обумовлений структурним станом металевої матриці після ізотермічного гартування.

Отримані результати випробувань використовували для оцінювання впливу температури ізотермічного гартування на міцність та пластичність досліджуваного матеріалу. Узагальнені результати механічних випробувань наведено далі.

Одним із головних завдань ізотермічного гартування є підвищення комплексу механічних властивостей високоміцного чавуну. Відомо, що зміна температури ізотермічної витримки суттєво впливає на структурний стан металевої основи, а отже і на показники міцності, пластичності та ударної в'язкості матеріалу. Тому на наступному етапі роботи було проведено аналіз механічних властивостей зразків після ізотермічного гартування за температур 280 °С, 310 °С та 350 °С. Результати визначення межі міцності при розтягу наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Вплив температури ізотермічного гартування на межу міцності високоміцного чавуну

Температура ізотермічного гартування, °С	Межа міцності, МПа
280	1320
310	1250
350	1020

Графічне представлення отриманих результатів наведено на рис. 3.9.

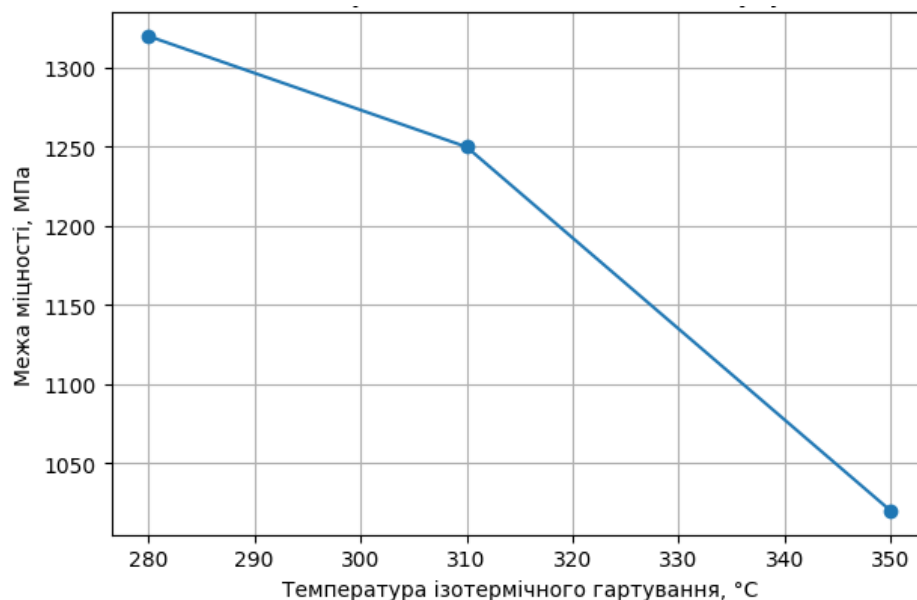


Рисунок 3.9 – Вплив температури ізотермічного гартування на межу міцності високоміцного чавуну

Як видно з отриманих результатів, максимальне значення межі міцності спостерігається після ізотермічного гартування за температури 280 °С. Підвищення температури ізотермічної витримки супроводжується поступовим зменшенням міцності матеріалу. Так, при температурі 350 °С межа міцності знижується приблизно на 23 % у порівнянні зі зразками, обробленими за температури 280 °С.

Отримані результати добре узгоджуються з даними металографічних досліджень. Найвищі значення міцності відповідають найбільш дисперсній структурі, яка формується при нижчих температурах ізотермічного гартування. При підвищенні температури витримки відбувається поступове укрупнення структурних складових, що призводить до зменшення опору руйнуванню. Для оцінки пластичних властивостей матеріалу було визначено відносне подовження після руйнування зразків. Результати досліджень наведено в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Вплив температури ізотермічного гартування на відносне подовження високоміцного чавуну

Температура ізотермічного гартування, °С	Відносне подовження, %
280	2,0
310	4,5
350	7,5

Залежність відносного подовження від температури ізотермічного гартування наведено на рис. 3.10.

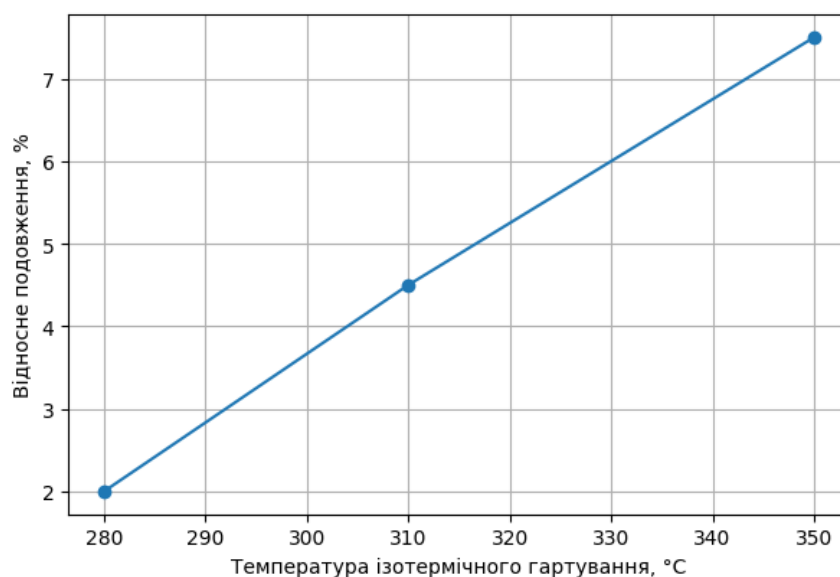


Рисунок 3.10 – Вплив температури ізотермічного гартування на відносне подовження високоміцного чавуну

На відміну від міцності, показники пластичності зростають зі збільшенням температури ізотермічного гартування. Найменше значення відносного подовження характерне для температури 280 °C, тоді як при температурі 350 °C пластичність зростає більш ніж у три рази. Така закономірність пояснюється формуванням менш дисперсної структури, яка забезпечує кращу здатність матеріалу до пластичної деформації.

Для більш повної оцінки механічних властивостей досліджуваного матеріалу було визначено ударну в'язкість зразків після ізотермічного гартування. Отримані результати наведено в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 – Вплив температури ізотермічного гартування на ударну в'язкість високоміцного чавуну

Температура ізотермічного гартування, °C	Ударна в'язкість, кг·м/см ²
280	4,5
310	6,8
350	5,5

Графічна залежність ударної в'язкості від температури ізотермічного гартування наведена на рис. 3.11.

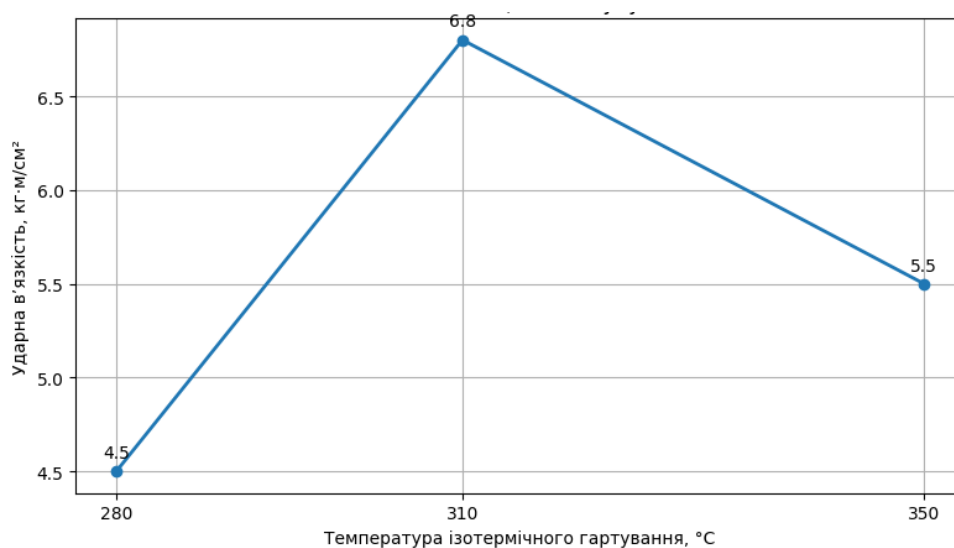


Рисунок 3.11 – Вплив температури ізотермічного гартування на ударну в'язкість високоміцного чавуну

Аналіз результатів показує, що максимальне значення ударної в'язкості спостерігається після ізотермічного гартування за температури 310 °C. Це свідчить про формування найбільш сприятливого співвідношення міцності та пластичності. При нижчій температурі матеріал характеризується підвищеною твердістю і міцністю, але має нижчу здатність до поглинання енергії ударного навантаження. Підвищення температури до 350 °C сприяє зростанню пластичності, проте супроводжується певним зниженням ударної в'язкості.

Таким чином, результати механічних випробувань підтверджують суттєвий вплив температури ізотермічного гартування на властивості високоміцного чавуну. Максимальні значення твердості та міцності досягаються після ізотермічного гартування за температури 280 °C. Найкраще поєднання міцності, пластичності та ударної в'язкості забезпечується після ізотермічного гартування за температури 310 °C, тоді як температура 350 °C сприяє підвищенню пластичності матеріалу при одночасному зниженні його міцнісних характеристик.

3.4 Обґрунтування раціональної температури ізотермічного гартування високоміцного чавуну

Проведені дослідження дозволили встановити закономірності впливу температури ізотермічного гартування на структуру та механічні властивості високоміцного чавуну. Аналіз результатів металографічних досліджень, вимірювання твердості та механічних випробувань показав, що температура ізотермічної витримки є одним із визначальних факторів формування комплексу експлуатаційних властивостей матеріалу.

У процесі дослідження було встановлено, що після ізотермічного гартування за температури 280 °С формується найбільш дисперсна структура металевої основи. Такий структурний стан забезпечує максимальні значення твердості та межі міцності, які становлять відповідно 435 НВ та 1320 МПа. Разом із тим даний режим характеризується найнижчими показниками пластичності та ударної в'язкості, що може обмежувати використання матеріалу в умовах динамічних і ударних навантажень.

Підвищення температури ізотермічного гартування до 350 °С сприяє збільшенню пластичності матеріалу. Відносне подовження при цьому зростає до 7,5 %, що є найвищим показником серед досліджених режимів. Однак одночасно спостерігається істотне зниження твердості та межі міцності, які становлять 340 НВ та 1020 МПа відповідно. Отже, даний режим забезпечує високі пластичні властивості, проте поступається іншим режимам за міцнісними характеристиками.

Особливий інтерес становлять результати, отримані після ізотермічного гартування за температури 310 °С. Для цього режиму характерне найбільш збалансоване поєднання механічних властивостей. Твердість матеріалу становить 410 НВ, межа міцності – 1250 МПа, відносне подовження – 4,5 %, а ударна в'язкість досягає максимального значення 6,8 кг·м/см². Отримані результати свідчать про формування структури, яка забезпечує одночасно високий рівень міцності та достатню пластичність матеріалу.

Для узагальнення отриманих результатів основні механічні властивості досліджуваного чавуну після ізотермічного гартування наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Порівняння механічних властивостей високоміцного чавуну після ізотермічного гартування

Температура ізотермічного гартування, °С	Твердість, НВ	Межа міцності, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, кг·м/см ²
280	435	1320	2,0	4,5
310	410	1250	4,5	6,8
350	340	1020	7,5	5,5

Порівняльний аналіз наведених даних показує, що температура ізотермічного гартування 310 °С забезпечує найкращий баланс між міцністю, твердістю, пластичністю та ударною в'язкістю. Саме за цього режиму досягається найбільш сприятливе поєднання властивостей, необхідних для роботи деталей машин в умовах складного навантаження.

Отримані результати узгоджуються з даними науково-технічної літератури, відповідно до яких середній температурний інтервал ізотермічного гартування забезпечує формування структури, що поєднує високі міцнісні характеристики з достатнім рівнем пластичності та опору крихкому руйнуванню.

Таким чином, на основі проведених досліджень встановлено, що раціональною температурою ізотермічного гартування досліджуваного високоміцного чавуну є 310 °С. Застосування даного режиму дозволяє отримати оптимальний комплекс механічних властивостей, що забезпечує перспективність використання матеріалу для виготовлення відповідальних деталей машин та механізмів, які працюють в умовах значних статичних і динамічних навантажень.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що підвищення температури ізотермічного гартування від 280 до 350 °С супроводжується зниженням дисперсності структури металевої основи та її поступовим укрупненням.

2. Дослідження показали, що максимальна твердість високоміцного чавуну досягається після ізотермічного гартування за температури 280 °С, тоді як зі збільшенням температури обробки твердість знижується.

3. Найвищі показники межі міцності отримано для зразків, оброблених за температури 280 °С. Підвищення температури ізотермічного гартування сприяє зростанню пластичності та ударної в'язкості матеріалу.

4. Фрактографічний аналіз підтвердив зміну характеру руйнування від більш крихкого при нижчих температурах до більш в'язкого при підвищенні температури ізотермічної витримки.

5. Встановлено, що температура ізотермічного гартування 310 °С забезпечує найбільш збалансований комплекс механічних властивостей і є раціональним режимом термічної обробки досліджуваного високоміцного чавуну.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Проведено аналіз науково-технічної літератури щодо структури, властивостей та особливостей ізотермічного гартування високоміцних чавунів з кулястим графітом. Встановлено, що температура ізотермічної витримки є одним із визначальних факторів формування структури та механічних властивостей матеріалу.

2. Розроблено методику експериментальних досліджень, яка передбачала аустенітизацію зразків за температури 900 °С з витримкою 30 хв та подальше ізотермічне гартування за температур 280, 310 і 350 °С протягом 180 хв.

3. Встановлено, що підвищення температури ізотермічного гартування супроводжується зниженням дисперсності металевої матриці, зменшенням твердості від 435 до 340 НВ та межі міцності від 1320 до 1020 МПа.

4. Показано, що зі збільшенням температури ізотермічного гартування пластичність матеріалу зростає від 2,0 до 7,5 %, а максимальне значення ударної в'язкості (6,8 кг·м/см²) досягається за температури 310 °С.

5. Фрактографічний аналіз підтвердив зміну характеру руйнування від переважно крихкого після обробки за температури 280 °С до більш в'язкого після ізотермічного гартування за температури 350 °С.

6. На підставі комплексу структурних та механічних досліджень встановлено, що раціональною температурою ізотермічного гартування досліджуваного високоміцного чавуну є 310 °С, яка забезпечує оптимальне поєднання міцності (1250 МПа), твердості (410 НВ), пластичності (4,5 %) та ударної в'язкості (6,8 кг·м/см²).

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ EN 1563:2019. Виливки з чавуну з кулястим графітом. Технічні умови. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 32 с.
2. ДСТУ ISO 945-1:2019. Мікроструктура чавунів. Частина 1. Класифікація графіту за результатами візуального аналізу. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. 28 с.
3. Кропівний В. М., Босий М. В., Кузик О. В., Кропівна А. М., Молокост Л. В. Термодинамічні закономірності структуроутворення високоміцного чавуну при модифікуванні та різних умовах кристалізації розплаву. Центральнотраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 9(40). Ч. 1. С. 27–36. DOI: 10.32515/2664-262X.2024.9(40).1.27-36.
4. Гогаєв К. О., Волощенко С. М., Подрезов Ю. М. та ін. Вплив температури ізотермічного гартування на зміцнення високоміцних чавунів при деформації. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2020. № 4. С. 96–102.
5. Фесенко А. М., Фесенко М. А. Дослідження процесів отримання виливків з високоміцного чавуну з кулястим графітом. Процеси лиття. 2025. Т. 7. DOI: 10.20535/2519-450X.7.2025.349089.
6. Дан Л. О. Щодо ролі залишкового аустеніту в поліпшенні комплексу властивостей високоміцного чавуну. Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2022. Вип. 45. С. 112–118.
7. Сіренко К. А. Оцінка хімічного складу і властивостей високоміцного чавуну з кулястим графітом. Процеси лиття. 2024. № 2. С. 34–42.
8. Бубликов В. Б., Бачинський Ю. Д., Ясинський О. О. Високоміцний чавун зі зміцненим кремнієм та нікелем α -твердим розчином. Метал та лиття України. 2020. № 3. С. 18–26.
9. Баглюк Г. А., Ковальчук О. В. Властивості та структура чавуну з кулястим графітом при внутрішньоформовому модифікуванні. Процеси лиття. 2024. № 1. С. 21–29.
10. Дорошенко В. С. Розробка способів контролю якості чавуну з кулястим графітом. Процеси лиття. 2018. № 4. С. 45–52.

11. Дорошенко В. С. Концепції охолодження виливків за допомогою поєднання лиття та ізотермічного гартування. *Метал та лиття України*. 2019. № 4. С. 37–44.
12. Волощенко С. М., Гогаєв К. О., Шинський О. Й. Дослідження властивостей високоміцного чавуну для деталей сільськогосподарської техніки залежно від хімічного складу та режимів термообробки. *Процеси лиття*. 2019. № 2. С. 56–63.
13. Лалазарова Н. О., та ін. Підвищення зносостійкості деталей з високоміцного чавуну шляхом термічної обробки. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2025. № 210. С. 115–123.
14. Куцова В. З. *Матеріалознавство та термічна обробка металів : підручник*. Дніпро : НМетАУ, 2021. 352 с.
15. Попович В. В. *Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник*. Львів : Світ, 2020. 624 с.
16. Волощенко В. С. *Теорія ливарних процесів : підручник*. Київ : НТУУ «КПІ», 2019. 480 с.
17. Найдек В. Л. *Ливарні сплави та технологія їх виробництва : монографія*. Київ : Наукова думка, 2020. 528 с.
18. Кропівний В. М. До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем Fe–Si, Mg–Si та Fe–Si–Mg. *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2023. Вип. 7(38). С. 64–71.

ДОДАТКИ