

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра: „Матеріалознавство та ливарне виробництво”

“Допущено до захисту”

зав. кафедрою МЛВ

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Олександр Кузик

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА** **за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

на тему:

**“Дослідження ефективності впливу комплексних  
модифікаторів на спеціальні властивості  
легованих чавунів”**

**“Study of the effectiveness of the influence  
of complex modifiers on the special properties  
of alloyed cast irons”**

Виконав здобувач вищої освіти  
IV курсу, групи МЗ-23мбз  
спеціальності 132 – «Матеріалознавство»

\_\_\_\_\_ Гупало А.В.  
“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

Керівник роботи

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Віктор Ломакін

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

Рецензент \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет \_\_\_\_\_ механіко-технологічний \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ матеріалознавства та ливарного виробництва \_\_\_\_\_  
Рівень вищої освіти \_\_\_\_\_ бакалавр \_\_\_\_\_  
Галузь знань \_\_\_\_\_ матеріалознавство \_\_\_\_\_  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 132 – Матеріалознавство \_\_\_\_\_  
Освітньо-професійна програма: Прикладне матеріалознавство та інжиніринг

ЗАТВЕРДЖУЮ:  
Завідувач кафедри

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

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

Гупало Анатолій Вікторович

прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: “Дослідження ефективності впливу комплексних модифікаторів на спеціальні властивості легованих чавунів”, затверджена наказом по університету № 169-02 від 13.03.26.
2. Керівник роботи: Ломакін Віктор Миколайович, к.т.н., доцент
3. Строк подання роботи до захисту: .06.2026 р.
4. Мета кваліфікаційної роботи: дослідити вплив комплексних модифікаторів на спеціальні властивості хромистих чавунів.

Завданням роботи є: огляд легованих чавунів; дослідження структури і властивостей легованих хромом чавунів після модифікування комплексними кальційвмісними модифікаторами і модифікаторами на основі РЗМ.

5. Консультанти по роботі із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
Огляд легованих чавунів	Ломакін В. М.		
Дослідження структури і спеціальних властивостей хромистих чавунів після модифікування комплексними модифікаторами	Ломакін В. М.		

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд легованих чавунів		
2.	Дослідження структури і спеціальних властивостей хромистих чавунів після модифікування комплексними модифікаторами		
4.	Оформлення пояснювальної записки		
5.	Оформлення рецензії		
6.	Захист кваліфікаційної роботи		

Дата видачі завдання:

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_

Ломакін В. М.

(прізвище та ініціали)

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_

Гупало А. В.

(прізвище та ініціали)

## Анотація

стор. 40, рис. 2, табл. 3, бібліографічних назв 7

### **Легований чавун, хром, мікроструктура, карбіди, зносостійкість, корозійна стійкість**

Кваліфікаційна робота за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти на тему “ Дослідження ефективності впливу комплексних модифікаторів на спеціальні властивості легованих чавунів ” складається із трьох розділів.

В першому розділі роботи наведена загальна характеристика легованих чавунів. Критично оглянуто -низько, -середньо і високолеговані чавуни. Окремо розглянуто функціональні чавуни (за експлуатаційними властивостями), що засвідчило комплексний підхід до класифікації легованих чавунів загалом.

Другий розділ роботи присвячено технологічним основам покращення структури і властивостей легованих чавунів. Розглянуто не лише легування і термічну обробку, а й зазначено про важливість металургійної чистоти розплаву, керування кристалізацією, модифікування, мікролегування, фізичні методи впливу (вібрація, електромагнітне переміщення, магнітне поле) і контроль режимів охолодження.

В третьому розділі, що узгоджений з метою даної роботи, виконано дослідження впливу комплексних модифікаторів на спеціальні властивості високохромистих чавунів. Показано високий позитивний вплив застосування кальційвмісних модифікаторів та модифікаторів на основі РЗМ (церій+ітрій). Така обробка сприяє коагуляції карбідів цементитного і не цементитного типів і зумовлює підвищення зносостійкості і корозійної стійкості такого матеріалу.

Виконана математична обробка статистичних даних дослідження і отримано математичні залежності прогнозування спеціальних властивостей високохромистого чавуну.

## Annotation

Page 40, fig. 2, table. 3, bibliographic titles 7

### **Alloyed cast iron, chromium, microstructure, carbides, wear resistance, corrosion resistance**

The qualification work for the first (bachelor's) level of higher education on the topic "Study of the effectiveness of the influence of complex modifiers on the special properties of alloyed cast irons" consists of three sections.

The first chapter of the work provides a general description of alloy cast irons. Low-, medium-, and high-alloy cast irons are critically examined. Functional cast irons (based on their performance properties) are separately considered, demonstrating a comprehensive approach to the classification of alloy cast irons as a whole.

The second section of the work is devoted to the technological foundations of improving the structure and properties of alloyed cast irons. Not only alloying and heat treatment are considered, but also the importance of metallurgical purity of the melt, crystallization control, modification, microalloying, physical methods of influence (vibration, electromagnetic stirring, magnetic field) and control of cooling modes are noted.

The third chapter, consistent with the objective of this work, examines the influence of complex modifiers on the specific properties of high-chromium cast irons. A significant positive effect is demonstrated with the use of calcium-containing modifiers and REE-based modifiers (cerium + yttrium). This treatment promotes the coagulation of cementite and non-cementite carbides and results in increased wear and corrosion resistance of this material.

Mathematical processing of the statistical data of the study was performed and mathematical dependences for predicting the special properties of high-chromium cast iron were obtained.

## Зміст

стор.

Вступ.....	7
1. Загальна характеристика легованих чавунів: склад, структура, властивості, область використання .....	8
1.1. Вимоги до легованих чавунів .....	8
1.2. Низько і -середньолеговані чавуни .....	10
1.2.1. Марганцеві чавуни .....	10
1.2.2. Малохромисті та низьколеговані нікелеві чавуни .....	11
1.2.3. Молібденові і мідисті чавуни .....	13
1.3. Високолеговані чавуни .....	14
1.3.1. Ніхарди .....	14
1.3.2. Високомарганцеві чавуни .....	16
1.3.3. Високохромисті чавуни .....	18
1.3.4. Висококремнієві чавуни .....	20
1.3.5. Аустенітні нікелеві чавуни .....	21
1.4. Функціональні чавуни (за експлуатаційними властивостями) .....	22
1.4.1. Жаростійкі чавуни .....	22
1.4.2. Антифрикційні чавуни .....	24
1.4.3. Кислототривкі чавуни .....	24
2. Технологічні основи покращення структури і властивостей легованих чавунів .....	26
3. Дослідження впливу комплексних модифікаторів на спеціальні властивості легованих чавунів .....	31
3.1. Експериментальна частина дослідження .....	31
3.2. Обробка статистичних даних випробувань .....	36
Висновок .....	39
Список літератури .....	40

## ВСТУП

Леговані чавуни є важливою групою конструкційних матеріалів, властивості яких визначаються не лише вмістом вуглецю, а й додаванням спеціальних легуючих елементів. Залежно від їх кількості розрізняють низьколеговані, середньолеговані та високолеговані чавуни. У низьколегованих вміст легуючих елементів невеликий і вони лише частково змінюють структуру, покращуючи окремі властивості, такі як міцність або зносостійкість. У середньолегованих вплив легування вже більш суттєвий – формується новий фазовий склад і значно підвищується комплекс експлуатаційних характеристик. Високолеговані чавуни характеризуються глибокою зміною структури (часто з утворенням аустеніту або великої кількості карбідів) і призначені для роботи в особливо складних умовах – високих температур, агресивних середовищ або інтенсивного зношування.

Серед легуючих елементів особливе місце займають хром і нікель. Хром є сильним карбідоутворювачем і сприяє формуванню твердих карбідів, що значно підвищує твердість і зносостійкість чавунів, а також покращує їх жаростійкість і частково корозійну стійкість. Нікель, навпаки, є аустенітоутворюючим елементом, який підвищує пластичність, ударну в'язкість і корозійну стійкість, а також забезпечує стабільність властивостей при низьких і високих температурах.

При одночасному легуванні хромом і нікелем досягається поєднання їхніх позитивних ефектів. Хром забезпечує високу зносостійкість і твердість за рахунок карбідів, тоді як нікель підвищує в'язкість і запобігає крихкості, стабілізуючи аустенітну або аустенітно-перлітну основу. Такі чавуни характеризуються збалансованим комплексом властивостей і широко застосовуються в умовах одночасної дії механічного зношування, високих температур і корозійних середовищ. Таким чином, комбіноване легування дозволяє отримати матеріали з наперед заданими характеристиками, що значно розширює сферу їх використання в сучасній техніці [1].

# **1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ЛЕГОВАНИХ ЧАВУНІВ: СКЛАД, СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ, ОБЛАСТЬ ВИКОРИСТАННЯ**

## **1.1. Вимоги до легованих чавунів**

До легованих чавунів висувається широкий комплекс вимог, які охоплюють не лише їх механічні властивості, а й структурну досконалість, технологічність, експлуатаційну надійність і економічну ефективність. Ці вимоги формуються з урахуванням того, що леговані чавуни працюють у складніших умовах, ніж звичайні, і часто використовуються для відповідальних деталей [1, 2].

Насамперед важливою є вимога до формування оптимальної та стабільної мікроструктури. Легування повинно забезпечувати керований фазовий склад — раціональне співвідношення металевої основи (феритної, перлітної, аустенітної або їх комбінацій) і зміцнюючих фаз, таких як карбіди або графіт. Структура має бути дрібнозернистою, однорідною по всьому об'єму відливки, без зон ліквіації, перегріву чи структурної неоднорідності. Особливу увагу приділяють формі та розподілу графіту (пластинчастий, кулястий, вермикулярний), оскільки це суттєво впливає на міцність і тріщиностійкість. Для карбідних чавунів важливо уникати надмірної крихкості через суцільні карбідні сітки.

Другим ключовим аспектом є забезпечення необхідного комплексу механічних властивостей. Леговані чавуни повинні мати достатню міцність на розтяг і стиск, твердість, зносостійкість, а також, за потреби, ударну в'язкість і опір втомі. При цьому важливо досягти раціонального балансу: підвищення твердості не повинно призводити до критичного зниження пластичності або тріщиностійкості. Для багатьох застосувань важливим є також опір контактному та корозійно-абразивному зношуванню.

Значна група вимог пов'язана з експлуатаційними властивостями. Леговані чавуни повинні витримувати вплив робочого середовища — високих температур, агресивних хімічних речовин, змінних навантажень, термічних циклів. Від них часто вимагають жаростійкості (опір окисненню при високих температурах), жароміцності (здатність зберігати міцність при нагріванні),

корозійної стійкості, а також стабільності розмірів і форми. Важливо, щоб у процесі експлуатації не відбувалися небажані структурні перетворення, такі як розпад аустеніту, коагуляція карбідів або ріст зерна, які можуть погіршити властивості матеріалу.

Окремо висуваються вимоги до технологічних властивостей. Леговані чавуни повинні мати добрі ливарні характеристики: достатню рідкотекучість, здатність заповнювати форму без утворення дефектів, контрольовану усадку. Важливо зменшити схильність до утворення гарячих і холодних тріщин, газових пор, усадочних раковин. Також суттєвим є питання оброблюваності різанням — хоча багато легованих чавунів є твердими, бажано, щоб вони залишалися придатними до механічної обробки хоча б на певних стадіях виготовлення. У деяких випадках важливою є також зварюваність або ремонтпридатність.

Не менш важливою є керованість властивостей через термічну обробку. Леговані чавуни повинні адекватно реагувати на відпал, нормалізацію, гартування, відпуск або спеціальні режими, такі як ізотермічна обробка. Це дозволяє змінювати співвідношення фаз, знімати внутрішні напруження, підвищувати міцність або в'язкість залежно від вимог. Важливо, щоб результати термообробки були стабільними і відтворюваними.

Суттєвою вимогою є також надійність і довговічність у роботі. Матеріал повинен забезпечувати прогнозований ресурс без раптових руйнувань. Це включає опір зародженню та поширенню тріщин, особливо в умовах циклічних або ударних навантажень. Для відповідальних деталей важливим є також контроль якості — відсутність внутрішніх дефектів, відповідність структури заданим параметрам.

Додатково враховуються економічні та ресурсні аспекти. Легування має бути обґрунтованим з точки зору вартості: досягнення необхідних властивостей повинно відбуватися з мінімальними витратами дорогих легуючих елементів, таких як нікель або молібден. Важливо також забезпечити стабільність хімічного складу при серійному виробництві та можливість використання стандартних технологічних процесів.

Таким чином, загальні вимоги до легованих чавунів охоплюють широкий спектр характеристик – від мікроструктури і механічних властивостей до технологічності, експлуатаційної стійкості та економічності. Саме комплексне виконання цих вимог забезпечує їх ефективне використання в різних галузях промисловості.

## **1.2. Низько і -середньолеговані чавуни**

### **1.2.1. Марганцеві чавуни**

Марганцеві чавуни з невеликим вмістом Mn (приблизно 1–5%) належать до найбільш економічно вигідних легованих чавунів, які широко застосовуються в загальному машинобудуванні. Їх головна особливість полягає в тому, що марганець у таких кількостях ще не змінює принципово тип структури, але суттєво впливає на технологічні та механічні властивості. Він підвищує міцність і твердість перлітної основи, покращує прокаліюваність, а також зв'язує сірку у вигляді MnS, що зменшує шкідливий вплив сірки і покращує якість литва. Важливим економічним аспектом є те, що марганець значно дешевший за хром і нікель, тому його використання дозволяє отримувати більш дешеві чавуни з покращеними властивостями без суттєвого ускладнення технології виробництва [2].

Структура таких чавунів залишається типовою для сірого чавуну і складається переважно з перлітної або перлітно-феритної металевої основи з включеннями графіту пластинчастої форми. У невеликій кількості можуть утворюватися карбіди типу  $(Fe,Mn)_3C$ , які рівномірно розподілені в структурі і не формують суцільного каркасного зміцнення, як у високохромистих або спеціальних зносостійких чавунах. За рахунок цього структура залишається відносно пластичною (у межах чавунів) і технологічною в обробці.

Властивості цих чавунів характеризуються помірною міцністю, середньою твердістю та достатньою зносостійкістю, яка перевищує нелеговані сірі чавуни, але значно поступається спеціальним високолегованим матеріалам. Ударна

в'язкість залишається невисокою, що є типовим для чавунів із графітною структурою. При цьому вони добре обробляються різанням, що є важливою перевагою для масового виробництва деталей.

Область застосування включає деталі загального машинобудування: корпуси машин і механізмів, кришки, станини, редукторні корпуси, втулки, кришки підшипникових вузлів та інші литі елементи, де важливими є дешевизна, технологічність і достатня експлуатаційна надійність. У таких умовах немає екстремальних ударних або абразивних навантажень, тому використання дорогих легуючих елементів недоцільне.

Термічна обробка зазвичай не є складною і використовується переважно для стабілізації структури. Найчастіше застосовують відпал для зняття внутрішніх напружень після лиття, а також нормалізацію для вирівнювання структури і підвищення однорідності перлітної основи. Гартування використовується рідко, оскільки ефект зміцнення в таких чавунах обмежений.

### **1.2.2. Малохромисті та низьколеговані нікелеві чавуни**

Малохромисті та нікелеві чавуни належать до легованих матеріалів, у яких властивості суттєво визначаються впливом легуючих елементів на фазовий склад і мікроструктуру. Введення хрому або нікелю змінює процес кристалізації, утворення карбідів і стабільність структурних складових, що дозволяє отримувати матеріали з наперед заданими експлуатаційними характеристиками [3].

Малохромисті чавуни характеризуються вмістом хрому приблизно 0,5–3%, що сприяє утворенню твердих карбідів типу  $(\text{Fe,Cr})_3\text{C}$ . Їх структура зазвичай складається з перлітної або перлітно-феритної основи з рівномірно розподіленими карбідами. У деяких випадках, при підвищеному вмісті вуглецю і швидкому охолодженні, можливе формування ледебуритної складової. Таке поєднання фаз забезпечує високу твердість і опір абразивному зношуванню, однак знижує пластичність і ударну в'язкість. Важливою особливістю є те, що

хром підвищує прокаліюваність, тому навіть при відносно невисокому його вмісті можна отримати більш однорідну структуру по перерізу відливки.

Термічна обробка малохромистих чавунів підбирається з урахуванням необхідного балансу між твердістю та тріщиностійкістю. Нормалізація дозволяє подрібнити перліт і підвищити міцність. Загартування з температур аустенітизації (приблизно 850–950 °С) з наступним відпуском формує більш дисперсну структуру і підвищує зносостійкість. Відпуск при середніх температурах застосовується для зменшення внутрішніх напружень і запобігання крихкому руйнуванню. У деяких випадках використовують поверхневе гартування для зміцнення лише робочого шару деталі.

Застосування малохромистих чавунів обумовлене їх здатністю протистояти інтенсивному механічному зношуванню. Вони ефективні в умовах абразивної дії сипких матеріалів – у гірничодобувній, цементній та будівельній галузях. Їх використовують для виготовлення елементів дробарок, млинів, транспортувальних систем, а також деталей, що працюють у контакті з піском, рудою або шлаком. Додатково їх застосовують у насосному обладнанні для перекачування пульп і суспензій, де важлива не тільки твердість, а й відносна стійкість до корозійно-абразивного зношування.

Нікелеві чавуни містять від 1 до 5% і більше нікелю, який є аустенітоутворюючим елементом і суттєво змінює структуру матеріалу. При невеликому вмісті нікелю формується перлітна структура з підвищеною міцністю, а при більшому — стабілізується аустеніт, що надає матеріалу високої пластичності, в'язкості та корозійної стійкості. Часто такі чавуни додатково легують хромом, молібденом або міддю, що дозволяє комплексно покращити їх властивості. Аустенітна структура особливо цінна тим, що вона зберігає свої характеристики при низьких і високих температурах, а також добре чинить опір утворенню тріщин.

Термічна обробка нікелевих чавунів залежить від їх складу. Для перлітних різновидів застосовують нормалізацію і загартування з відпуском для підвищення міцності. Аустенітні чавуни зазвичай піддають відпалу при високих температурах (близько 900–1050 °С) з повільним охолодженням для стабілізації

структури та зняття напружень. Іноді використовують ізотермічну обробку для отримання більш однорідної мікроструктури. Важливо, що нікель зменшує схильність до утворення крихких фаз, тому такі чавуни краще переносять термічні цикли.

Застосування нікелевих чавунів пов'язане з умовами, де необхідна стійкість до корозії, високих температур і змінних навантажень. Вони широко використовуються в хімічній, нафтохімічній і енергетичній промисловості для виготовлення деталей, що працюють в агресивних середовищах — кислотах, лугах, газах. У теплотехніці їх застосовують для елементів печей, теплообмінників і котлів, де важлива жаростійкість. У машинобудуванні нікелеві чавуни використовують для відповідальних деталей двигунів і компресорів, де потрібне поєднання міцності, зносостійкості та довговічності.

Додатково слід зазначити, що обидва типи чавунів можуть модифікуватися введенням графітуючих або карбідоутворюючих елементів, що дозволяє керувати формою і розподілом графіту або карбідів. Це дає можливість ще точніше адаптувати їх властивості до конкретних умов експлуатації. Також важливу роль відіграє технологія лиття, оскільки швидкість охолодження та склад форми впливають на кінцеву структуру і, відповідно, на характеристики матеріалу.

Таким чином, малохромисті чавуни доцільно використовувати там, де головним фактором є абразивне зношування, тоді як нікелеві чавуни ефективні в умовах складного термічного і корозійного впливу, забезпечуючи більшу надійність і довговічність деталей.

### **1.2.3. Молібденові і мідисті чавуни**

Молібденові, мідисті, висококремнієві, аустенітні нікелеві, антифрикційні та кислототривкі чавуни належать до важливих груп легованих чавунів, які використовуються для роботи в умовах, де звичайні сірі або ковкі чавуни не забезпечують необхідної довговічності. Їх характерною особливістю є те, що легуючі елементи не просто трохи підвищують властивості, а суттєво змінюють

процеси структуроутворення, фазовий склад і поведінку матеріалу під час експлуатації [3, 4].

Молибденові чавуни є одними з найбільш відповідальних конструкційних матеріалів серед цієї групи. Молибден, навіть у невеликих кількостях, різко підвищує прокалиюваність, міцність і особливо опір повзучості та втомному руйнуванню при підвищених температурах. У структурі таких чавунів формується дрібнодисперсна перлітна або мартенситно-перлітна основа з рівномірно розподіленими карбідами складного типу, які містять Мо. Ці карбіди є термічно стабільними і не схильні до коагуляції при нагріванні, що забезпечує збереження властивостей у часі. Завдяки цьому молибденові чавуни широко застосовуються у двигунобудуванні (блоки циліндрів, колінчасті вали, гільзи), а також у важконавантажених деталях компресорів, пресів і металургійного обладнання. Термічна обробка таких матеріалів зазвичай включає нормалізацію для подрібнення структури, гартування з наступним відпуском для формування міцної мартенситної матриці, а також відпал для зняття внутрішніх напружень після лиття. У деяких випадках застосовують ступінчасте гартування для зменшення крихкості.

Мідисті чавуни характеризуються тим, що мідь не утворює карбідів, але суттєво впливає на кінетику перетворень у твердому стані. Вона стабілізує перлітну структуру, сприяє її ущільненню та підвищує міцність без різкого зниження пластичності. У результаті формується переважно перлітна або перлітно-феритна матриця з рівномірно розподіленим графітом. Мідь також підвищує корозійну стійкість у атмосферних і слабкоагресивних середовищах. Такі чавуни широко застосовуються в будівельних конструкціях, корпусах насосів, трубопровідній арматурі, деталях машин, що працюють у вологих умовах, а також у загальному машинобудуванні. Термічна обробка зазвичай не є складною: найчастіше застосовують відпал для зняття внутрішніх напружень і нормалізацію для отримання більш рівномірної та щільної перлітної структури. Гартування використовується рідко, оскільки мідь не забезпечує значного ефекту зміцнення через фазові перетворення.

## 1.3. Високолеговані чавуни

### 1.3.1. Ніхарди

Ніхарди (Ni-Hard) — це група високолегованих білих чавунів, легованих нікелем і хромом, які спеціально розроблені для роботи в умовах інтенсивного абразивного зношування. Назва походить від поєднання слів *nickel* і *hard*, що відображає їх основні особливості — підвищену твердість за рахунок карбідів і покращену в'язкість завдяки нікелю [5].

Структурування ніхардів визначається взаємодією хрому, нікелю та вуглецю. Хром виступає сильним карбідоутворювачем і сприяє формуванню твердих карбідів типу  $(Fe,Cr)_3C$  або складніших карбідних фаз, які створюють жорсткий каркас у структурі. Нікель, у свою чергу, стабілізує аустеніт і пригнічує утворення фериту, що забезпечує більш пластичну та тріщиностійку металеву основу. У результаті формується типова структура ніхардів — карбідна (ледебуритна) евтектика, занурена в аустенітну або мартенситно-аустенітну матрицю. Після охолодження або термічної обробки частина аустеніту може перетворюватися на мартенсит, що додатково підвищує твердість. Важливо, що нікель стримує надмірну крихкість, яка була б характерна для чисто хромистих білих чавунів.

Властивості ніхардів формуються саме такою структурою. Вони мають дуже високу твердість (часто 50–65 HRC і більше) і виняткову стійкість до абразивного зношування. Завдяки нікелю їх ударна в'язкість і тріщиностійкість вищі, ніж у звичайних білих або високо-хромистих чавунів без нікелю. Вони добре чинять опір корозійно-абразивному зношуванню і можуть працювати при помірно підвищених температурах. Водночас їх пластичність залишається низькою, а оброблюваність різанням — обмеженою через високу твердість і наявність карбідів. Тому деталі з ніхардів зазвичай виготовляють із мінімальною подальшою механічною обробкою або застосовують шліфування.

Термічна обробка ніхардів спрямована на стабілізацію структури та підвищення експлуатаційних характеристик. Застосовують відпал для зняття

внутрішніх напружень після лиття, а також загартування з подальшим відпуском для утворення мартенситної матриці з дисперсними карбідами. У деяких випадках використовують стабілізуючий відпуск для зменшення кількості залишкового аустеніту і підвищення розмірної стабільності. Режими обробки підбираються так, щоб зберегти максимальну твердість при достатній тріщиностійкості.

Застосування ніхардів пов'язане з умовами інтенсивного абразивного та ударно-абразивного зношування. Вони широко використовуються в гірничодобувній, цементній та енергетичній промисловості. З них виготовляють кулі та футеровки млинів, деталі дробарок, шнеки, жолоби, робочі органи насосів для перекачування пульп і шламів. Також ніхарди застосовують у обладнанні для транспортування сипких матеріалів, де поверхні постійно піддаються дії твердих частинок. У деяких випадках їх використовують у комбінованих конструкціях (наприклад, біметалевих деталях), де зносостійкий шар із ніхарду поєднується з більш в'язкою основою.

Таким чином, ніхарди є прикладом ефективного поєднання дії хрому і нікелю: перший забезпечує високу твердість і зносостійкість, а другий — підвищує в'язкість і стабільність структури. Це робить їх незамінними матеріалами для роботи в особливо важких умовах зношування.

### **1.3.2. Високомарганцеві чавуни**

Високомарганцеві чавуни містять значно більший вміст марганцю — зазвичай понад 10–12%, а в окремих випадках до 15% і більше. У цьому діапазоні марганець вже виконує не допоміжну, а ключову структуроутворюючу роль. Він стабілізує аустенітну структуру, різко пригнічує утворення перліту і забезпечує збереження аустеніту при кімнатній температурі. Це принципово відрізняє їх від звичайних марганцевих чавунів і визначає їх унікальні експлуатаційні властивості [5].

Структура таких чавунів є переважно аустенітною, іноді з невеликою кількістю карбідів типу  $(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{C}$  або інших складних карбідних фаз, які можуть

утворюватися залежно від вмісту вуглецю, швидкості охолодження та умов кристалізації. Важливою особливістю є метастабільність аустеніту: під дією ударних і абразивних навантажень він здатний до деформаційного зміцнення (наклепу), у результаті чого поверхневі шари матеріалу поступово стають твердішими саме в процесі експлуатації. Це явище є однією з головних причин високої зносостійкості цих чавунів.

Властивості високомарганцевих чавунів суттєво відрізняються від звичайних. Вони характеризуються дуже високою ударною в'язкістю, здатністю витримувати значні динамічні навантаження та унікальною здатністю до самозміцнення. Початкова твердість відносно невисока, але в процесі експлуатації вона може значно зростати за рахунок наклепу. Саме тому ці матеріали особливо ефективні в умовах поєднання ударів і абразивного зношування.

З економічної точки зору важливо, що марганець значно дешевший за нікель і хром, які також використовуються для отримання аустенітних або високоміцних структур. Тому високомарганцеві чавуни є відносно дешевою альтернативою дорогим високолегованим сталям і чавунам у важких умовах експлуатації.

Область застосування цих чавунів пов'язана з екстремальними умовами роботи. Вони використовуються у гірничодобувній промисловості для деталей дробарок (щоки, конуси, броні), у будівельній техніці (ковші екскаваторів, зуби ковшів), у рейкових і ударних елементах, а також у вузлах, де поєднуються удари і абразивне зношування. Їх ключова перевага — здатність працювати в умовах, де інші матеріали швидко руйнуються.

Термічна обробка таких чавунів зазвичай полягає у високотемпературному розчинному відпалі з наступним швидким охолодженням. Такий режим дозволяє розчинити карбіди, отримати однорідну аустенітну структуру і забезпечити максимальну в'язкість та правильну роботу механізму наклепу. Додаткові термічні обробки застосовуються рідко, оскільки головною експлуатаційною “обробкою” є сам процес роботи матеріалу під навантаженням.

### 1.3.3. Високохромисті чавуни

Високохромисті чавуни є групою високолегованих білих чавунів, у яких вміст хрому перевищує приблизно 15%, а в окремих марках може сягати 20–30% і більше. Вони належать до найефективніших зносостійких матеріалів і застосовуються там, де деталі працюють в умовах інтенсивного абразивного або корозійно-абразивного зношування. Їх особливість полягає в тому, що структура формується майже повністю за рахунок карбідів, тоді як металева основа виконує роль зв'язки і визначає рівень в'язкості та тріщиностійкості [5, 6].

Основу складу високохромистих чавунів становить залізо, вуглець і хром, причому вміст вуглецю зазвичай знаходиться в межах 2,0–3,5%. Саме така кількість вуглецю забезпечує утворення значної частки карбідної фази під час кристалізації. Хром є ключовим легуючим елементом, який не лише підвищує зносостійкість, а й визначає тип карбідів і загальний характер структури. У деяких випадках до складу також вводять молібден, нікель або марганець, які використовуються для підвищення прокаліюваності, стабілізації структури та покращення тріщиностійкості. Нікель, зокрема, може частково стабілізувати аустеніт, тоді як молібден підвищує термічну стабільність і опір розм'якшенню при нагріванні.

Структура високохромистих чавунів є складною і визначається взаємодією карбідної та металевої фаз. Основною зміцнюючою складовою є карбіди типу  $M_7C_3$ , де  $M$  переважно представлений хромом із частковою заміною залізом. Саме ці карбіди мають дуже високу твердість і формують безперервний або сітчастий каркас, який забезпечує виняткову зносостійкість. При певних умовах твердіння або термічної обробки можуть також утворюватися карбіди типу  $M_{23}C_6$ , які є більш дрібнодисперсними і впливають на стабілізацію структури. Металева основа між карбідами може бути аустенітною, мартенситною або сумішшю мартенситу й залишкового аустеніту, залежно від швидкості охолодження та режиму термообробки. Чим більша частка мартенситу, тим вища твердість і зносостійкість, але нижча в'язкість.

Формування структури відбувається як у процесі первинної кристалізації, так і під час подальшої термічної обробки. У литому стані зазвичай формується ледебуритоподібна структура, де карбіди рівномірно розподілені в металевій матриці. Після термічної обробки можна змінювати співвідношення фаз, розчиняти частину карбідів або трансформувати аустеніт у мартенсит, що дозволяє регулювати властивості матеріалу.

Властивості високохромистих чавунів визначаються насамперед їх карбідною структурою. Вони мають дуже високу твердість, яка часто знаходиться в межах 55–65 HRC і може бути навіть вищою залежно від режиму обробки. Їх головною перевагою є виняткова стійкість до абразивного зношування, оскільки тверді карбіди  $M_7C_3$  ефективно протидіють руйнуванню поверхні під дією твердих частинок. Крім того, завдяки високому вмісту хрому ці чавуни мають підвищену корозійну та частково жаростійку здатність, оскільки на поверхні може формуватися захисна оксидна плівка. Водночас вони характеризуються низькою ударною в'язкістю і крихкістю, що обмежує їх використання в умовах ударних навантажень або різких термічних змін. Також слід враховувати складність механічної обробки, оскільки висока твердість і наявність карбідів практично виключають традиційне різання.

Термічна обробка високохромистих чавунів використовується для регулювання співвідношення твердості та в'язкості. Найбільш поширеним є відпал, який застосовують для зняття внутрішніх напружень після лиття і стабілізації структури без суттєвих фазових змін. Гартування проводять шляхом нагріву до температур приблизно 950–1100 °C, залежно від складу, з метою часткового розчинення карбідів і утворення аустенітної матриці з подальшим швидким охолодженням, у результаті чого формується мартенсит або мартенситно-аустенітна структура. Такий стан забезпечує максимальну твердість і зносостійкість. Після гартування зазвичай застосовують відпуск, який зменшує крихкість, знімає внутрішні напруження і стабілізує структуру, хоча при цьому дещо знижується твердість. У деяких випадках використовують ступінчасте або ізотермічне охолодження, що дозволяє більш точно керувати балансом між міцністю і в'язкістю.

Область застосування високохромистих чавунів визначається їх здатністю працювати в умовах інтенсивного зношування. Вони широко використовуються в гірничодобувній промисловості для виготовлення футеровок кульових і стрижневих млинів, робочих органів дробарок, бронеплит і захисних елементів обладнання. У цементній і будівельній промисловості їх застосовують у вузлах, що контактують із абразивними матеріалами, такими як пісок, щебінь і клінкер. У хімічній та енергетичній промисловості їх використовують для насосів, що перекачують пульпи та шлами, а також для різних зносостійких елементів трубопроводів і транспортувальних систем. У всіх цих випадках ключовою вимогою є не міцність у класичному розумінні, а здатність протистояти поступовому поверхневому руйнуванню.

Таким чином, високохромисті чавуни являють собою матеріали з домінуючою карбідною структурою, де карбіди типу  $M_7C_3$  формують основу зносостійкості, а металева матриця забезпечує необхідну в'язкість і тріщиностійкість. Підвищення вмісту хрому понад 15–20% дозволяє суттєво збільшити експлуатаційну довговічність у найважчих умовах, хоча й супроводжується зростанням крихкості та обмеженням сфер застосування.

#### **1.3.4. Висококремнієві чавуни**

Висококремнієві (силіційні) чавуни займають особливе місце серед корозійностійких матеріалів. Кремній є сильним графітизуючим елементом і водночас різко підвищує хімічну стійкість, особливо в кислотних середовищах. У таких чавунах структура переважно феритна або феритно-графітна, з мінімальною кількістю карбідів, оскільки кремній пригнічує їх утворення. Це робить матеріал хімічно інертним, але водночас крихким і малопластичним. Основною перевагою є висока кислотостійкість, особливо в середовищах сірчаної, азотної та органічних кислот (у певних концентраціях). Такі чавуни застосовуються в хімічному машинобудуванні для насосів, реакторів,

змішувачів, трубопроводів і ємностей. Термічна обробка в основному обмежується відпалом для зняття внутрішніх напружень, оскільки структура вже є стабільною і практично не піддається зміцненню гартуванням [6].

### **1.3.5. Аустенітні нікелеві чавуни**

Аустенітні нікелеві чавуни є одними з найбільш універсальних корозійностійких матеріалів. Високий вміст нікелю стабілізує аустеніт навіть при кімнатній температурі, завдяки чому структура залишається аустенітною або аустенітно-графітною. У деяких випадках можуть утворюватися невеликі кількості карбідів, якщо присутні додаткові легуючі елементи, наприклад хром або молібден. Така структура забезпечує високу ударну в'язкість, добру пластичність і стабільність властивостей у широкому діапазоні температур, включаючи низькі температури, де інші чавуни стають крихкими. Вони широко застосовуються в хімічній промисловості, нафтогазовому обладнанні, морській техніці, насосах і арматурі для агресивних середовищ, а також у деталях, що працюють при термоциклюванні. Термічна обробка включає стабілізуючий високотемпературний відпал для вирівнювання аустенітної структури та зняття внутрішніх напружень, а також іноді ізотермічні режими для підвищення однорідності та стабільності структури [6, 7].

## 1.4. Функціональні чавуни (за експлуатаційними властивостями)

### 1.4.1. Жаростійкі чавуни

Жаростійкі чавуни є спеціально легованими матеріалами, які призначені для роботи при підвищених температурах в умовах дії окиснювальних газових середовищ, таких як повітря або продукти згоряння палива. Основною вимогою до них є здатність протистояти утворенню окалини, тобто поверхневого окиснення, яке при високих температурах призводить до поступового руйнування металу, а також збереження достатньої структурної стабільності та міцності в процесі тривалої експлуатації [7].

Хромисті жаростійкі чавуни є однією з найбільш поширених груп таких матеріалів. Їх основною легуючою складовою є хром, який виконує одразу дві важливі функції. З одного боку, він є сильним карбідоутворюючим елементом і формує у структурі тверді карбіди типу  $(Fe, Cr)_3C$ , що підвищує твердість і частково зносостійкість матеріалу. З іншого боку, хром забезпечує високу окалиностійкість завдяки утворенню на поверхні щільної, міцно зв'язаної оксидної плівки  $Cr_2O_3$ , яка перешкоджає подальшому проникненню кисню в глибину металу. Структура таких чавунів зазвичай складається з перлітної або феритно-перлітної металевої основи з рівномірно розподіленими карбідами, а при підвищеному вмісті хрому може частково стабілізуватися і більш складна карбідна або навіть аустенітна складова. Завдяки цьому хромисті чавуни поєднують відносно високу твердість і зносостійкість із задовільною жаростійкістю, однак їх пластичність залишається невисокою через наявність крихких карбідних фаз. Температурна межа їх ефективної роботи зазвичай становить приблизно 700–900 °C залежно від складу та умов експлуатації.

Область застосування хромистих жаростійких чавунів досить широка і пов'язана насамперед із роботою в умовах гарячих газів і термічного навантаження. Їх використовують у колосниках промислових печей, деталях топкових камер, пальникових пристроях, елементах котельного обладнання, а також у вузлах термічних агрегатів у цементній, металургійній та енергетичній

промисловості. Крім жаростійкості, у цих умовах часто важливою є також стійкість до абразивного зношування, що додатково підвищує цінність хромистих чавунів.

Алюмінієві жаростійкі чавуни відрізняються іншим механізмом забезпечення жаростійкості. Основним легуючим елементом у них є алюміній, який має дуже високу спорідненість до кисню і формує на поверхні надзвичайно щільну та хімічно стабільну оксидну плівку  $Al_2O_3$ . Ця плівка практично непроникна для кисню і має властивість до самовідновлення, що забезпечує дуже високу окалинотійкість навіть при температурах, які перевищують можливості хромистих чавунів, часто до 900–1000 °C і вище. Структура таких чавунів зазвичай представлена феритною або феритно-перлітною основою, оскільки алюміній не сприяє утворенню великої кількості карбідів, але може формувати окремі інтерметалічні сполуки, які впливають на твердість і крихкість матеріалу. Загалом алюмінієві чавуни характеризуються меншою щільністю, дуже високою жаростійкістю, але зниженою міцністю та ударною в'язкістю порівняно з іншими легованими чавунами.

Їх застосування зосереджене в умовах максимально високих температур, де механічні навантаження не є критично високими. Це елементи високотемпературних печей, жарові труби, деталі гартувальних і нагрівальних установок, компоненти обладнання для спалювання палива з високою температурою полум'я, а також вузли металургійних і енергетичних агрегатів, де головною вимогою є довготривала стійкість до окиснення.

Таким чином, хромисті жаростійкі чавуни забезпечують поєднання окалинотійкості та відносно кращих механічних властивостей завдяки карбідній структурі та захисній дії  $Cr_2O_3$ , тоді як алюмінієві чавуни демонструють ще вищу термічну стійкість завдяки оксидній плівці  $Al_2O_3$ , але поступаються за міцністю і пластичністю. Саме тому вибір між ними визначається конкретними умовами роботи: балансом температури, навантажень і агресивності середовища.

### **1.4.2. Антифрикційні чавуни**

Антифрикційні чавуни є функціональною групою, призначеною для роботи в умовах тертя ковзання. Їх основна ідея полягає у створенні структури, яка забезпечує низький коефіцієнт тертя та високу зносостійкість. У таких чавунах зазвичай формується перлітно-феритна матриця з рівномірно розподіленими включеннями графіту, який виконує роль твердого мастила і зменшує тертя в парі ковзання. Додаткове легування міддю, нікелем або хромом дозволяє підвищити міцність і стабільність структури, не погіршуючи антифрикційні властивості. Такі матеріали застосовуються у підшипниках ковзання, втулках, напрямних, парах тертя редукторів і компресорів. Термічна обробка включає нормалізацію для отримання оптимальної твердості та зносостійкості, а також відпал для стабілізації розмірів і зняття внутрішніх напружень, що особливо важливо для точних деталей [7].

### **1.4.3. Кислототривкі чавуни**

Кислототривкі чавуни часто за складом перетинаються з кремнієвими та аустенітними, але їх головною ознакою є здатність тривалий час працювати в агресивних хімічних середовищах без значної корозії. Їх структура може бути феритною або аустенітною залежно від системи легування, причому вміст карбідів намагаються мінімізувати, оскільки вони знижують корозійну стійкість через утворення гальванічних пар. Такі чавуни широко застосовуються в хімічній промисловості для реакторів, насосів, трубопроводів і ємностей, що контактують із кислотами та лугами. Термічна обробка зазвичай обмежується стабілізуючим відпалом, який знімає внутрішні напруження після лиття і підвищує довговічність у корозійних умовах [7].

Узагальнюючи, можна сказати, що ці групи легованих чавунів відрізняються не лише складом, а й принципово різними механізмами формування властивостей. Молібден забезпечує термостійкість і міцність, мідь стабілізує перліт і підвищує корозійну стійкість, кремній формує

кислототривкість, нікель стабілізує аустеніт і підвищує в'язкість, а графіт у антифрикційних чавунах визначає зниження тертя. Термічна обробка в цих матеріалах використовується або для зміцнення, або для стабілізації структури та зняття напружень, що і забезпечує їх широке застосування в різних галузях промисловості.

## 2. ТЕХНОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ПОКРАЩЕННЯ СТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛЕГОВАНИХ ЧАВУНІВ

У легованих і високолегованих чавунах властивості формуються не лише хімічним складом, а й цілим комплексом технологічних впливів, які дозволяють керувати процесами кристалізації, типом графіту, карбідоутворенням, дисперсністю структури та співвідношенням фаз. Особливо це важливо для хромистих, марганцевих і нікелевих чавунів, оскільки вони мають схильність до утворення як надмірно крихких карбідних структур, так і нестабільних аустенітних станів. Тому в промисловості застосовується цілий комплекс металургійних і технологічних заходів, спрямованих на оптимізацію структури ще на стадії плавки, розливання і подальшої термообробки.

У хромистих чавунах основною задачею є керування кількістю, формою і розподілом карбідів типу  $M_7C_3$  та  $M_{23}C_6$ , оскільки саме вони визначають зносостійкість, але одночасно підвищують крихкість. Одним із найважливіших заходів є модифікування, яке здійснюється введенням невеликих кількостей титану, ванадію, бору або рідкісноземельних елементів. Ці добавки сприяють подрібненню первинних карбідів, зменшують їх сітчастість і забезпечують більш рівномірний розподіл у матриці. В результаті підвищується тріщиностійкість без значної втрати зносостійкості. Додатково застосовується контроль швидкості охолодження, який дозволяє уникати грубих евтектичних карбідних сіток.

Важливим технологічним прийомом є термічна обробка, зокрема гартування з високих температур з подальшим відпуском. Такий режим дозволяє частково розчинити карбіди в аустенітній матриці і отримати структуру мартенсит + залишковий аустеніт, що забезпечує оптимальний баланс твердості і в'язкості. У деяких випадках застосовують ізотермічне гартування або ступінчасте охолодження для зниження внутрішніх напружень. Також використовується стабілізуючий відпал для зняття напружень після лиття.

У сучасних технологіях для хромистих чавунів застосовують також фізичні методи впливу на розплав. Зокрема, продувка інертними газами (аргон, іноді азот) використовується для видалення неметалевих включень і газів, що

покращує однорідність металу. Вібраційний вплив на кристалізацію дозволяє подрібнювати зерно і карбідні включення, зменшуючи їх розміри та підвищуючи рівномірність структури. Магнітне поле також може впливати на процеси кристалізації, сприяючи орієнтації та більш рівномірному розподілу фаз, хоча цей метод є менш поширеним і використовується переважно в дослідних або спеціальних умовах.

У марганцевих і високомарганцевих чавунах основна проблема полягає у стабілізації аустеніту та запобіганні утворенню крихких карбідів, які знижують ефект самозміцнення. Тому ключовим є правильне розкислення і очищення розплаву. Використовують продувку аргоном, що дозволяє зменшити кількість газових включень і підвищити чистоту металу. Важливу роль відіграє модифікування, зокрема введення невеликих кількостей алюмінію, титану або рідкісноземельних елементів, які сприяють подрібненню зерна аустеніту і стабілізації структури.

У високомарганцевих чавунах дуже важливим є режим термічної обробки — розчинний відпал при високих температурах з наступним швидким охолодженням. Це дозволяє повністю розчинити карбіди і отримати однорідний аустеніт, який забезпечує максимальну ударну в'язкість і здатність до наклепу. Якщо охолодження недостатньо швидке, можливе виділення карбідів по межах зерен, що різко погіршує властивості.

Додатково застосовують механічні методи впливу на структуру під час кристалізації. Вібраційне лиття дозволяє зменшити розмір зерна аустеніту і покращити однорідність структури. У деяких випадках використовують електромагнітне перемішування розплаву, що сприяє рівномірному розподілу легуючих елементів і зменшенню ліквації. Магнітне поле може впливати на напрям росту кристалів, хоча його промислове застосування поки обмежене.

У нікелевих і аустенітних чавунах головним завданням є стабілізація аустенітної структури і запобігання утворенню карбідів, які знижують корозійну стійкість і пластичність. Тому тут особливо важливі чистота розплаву і контроль швидкості кристалізації. Продувка інертними газами використовується для зниження вмісту кисню і водню, що покращує якість литва і зменшує пористість.

Модифікування в нікелевих чавунах часто здійснюється невеликими добавками кремнію, міді або молібдену, які стабілізують структуру і підвищують корозійну та термічну стійкість. Нікель сам по собі є сильним стабілізатором аустеніту, тому основний акцент робиться не на фазовій трансформації, а на дисперсності структури і зниженні дефектності.

Термічна обробка аустенітних нікелевих чавунів включає стабілізуючий відпал при високих температурах, який дозволяє вирівняти хімічний склад по зернах, зняти внутрішні напруження і зменшити схильність до міжкристалітної корозії. У деяких випадках застосовують ступінчасте охолодження або ізотермічні витримки для формування більш однорідної аустенітної структури.

Таким чином, комплекс впливів на структуру легованих і високолегованих чавунів включає металургійні методи (легування, модифікування, рафінування розплаву, продувка газами), фізичні методи (вібраційний вплив, електромагнітне перемішування, вплив магнітного поля), а також термічні режими (гартування, відпуск, відпал, розчинні обробки). Саме поєднання цих підходів дозволяє керувати формуванням карбідів, стабілізувати аустеніт або перліт, зменшувати крихкість і досягати оптимального балансу між зносостійкістю, міцністю та експлуатаційною довговічністю.

У загальному випадку для всіх легованих і високолегованих чавунів важливо розуміти, що керування структурою починається ще до твердіння металу, тобто на стадії підготовки розплаву. Одним із ключових напрямів є рафінування, тобто очищення розплаву від неметалевих включень, оксидів і газів. Це досягається не лише продувкою інертними газами, але й використанням шлакових рафінувальних сумішей, які зв'язують домішки і зменшують кількість центрів крихкого руйнування. Чим чистіший розплав, тим рівномірніше проходить кристалізація і тим менше утворюється дефектних зон у структурі.

Важливим є також контроль перегріву і швидкості охолодження. Перегрів розплаву перед розливанням дозволяє зменшити кількість зародкових центрів кристалізації і тим самим керувати розміром зерна та карбідних включень. У хромистих чавунах це дозволяє уникати грубих евтектичних карбідних сіток, які різко знижують ударну в'язкість. Навпаки, прискорене охолодження сприяє

подрібненню структури і формуванню більш рівномірного розподілу карбідів  $M_7C_3$ .

У марганцевих чавунах важливим є контроль ліквідаційних процесів, оскільки марганець має схильність до нерівномірного розподілу в об'ємі злитка. Тому застосовують інтенсивне перемішування розплаву, включно з електромагнітним впливом, який зменшує хімічну неоднорідність і сприяє формуванню стабільного аустеніту. У високомарганцевих чавунах це особливо критично, оскільки навіть невеликі локальні відхилення складу можуть призвести до утворення небажаних карбідів і втрати ефекту наклепу.

Додатковим напрямом є мікролегування і комплексне модифікування. У хромистих системах часто використовують комбінації V, Ti, Nb, W, які утворюють дуже дрібні карбіди і виступають як центри кристалізації, забезпечуючи подрібнення структури. У нікелевих чавунах навпаки прагнуть зменшити кількість карбідоутворюючих елементів і стабілізувати аустеніт, тому використовують Si і Ni як основні стабілізатори. У марганцевих чавунах мікролегування використовується для корекції структури аустеніту і підвищення стійкості до ударних навантажень.

Окремо слід виділити вплив термомеханічних і фізичних методів обробки. Вібраційний вплив під час кристалізації не лише подрібнює зерно, але й порушує дендритний ріст, що зменшує ліквідацію і підвищує однорідність розподілу легуючих елементів. Електромагнітне перемішування виконує подібну функцію, але більш рівномірно впливає на весь об'єм розплаву, що особливо важливо для великих виливків.

Магнітне поле в окремих випадках використовується для впливу на напрям росту кристалів і орієнтацію фаз, що може змінювати морфологію карбідів і навіть форму графітних включень у деяких системах. Хоча цей метод поки не є масовим у промисловості, він перспективний для отримання матеріалів з контрольованою анізотропією властивостей.

У термічній обробці, окрім класичних режимів (відпал, нормалізація, гартування, відпуск, розчинна обробка), важливу роль відіграють багатоступінчасті режими. Наприклад, ступінчасте гартування дозволяє

зменшити внутрішні напруження і ризик тріщиноутворення, а ізотермічні витримки – стабілізувати аустеніт або керувати розпадом карбідів. У високолегованих хромистих чавунах це особливо важливо, оскільки надмірна карбідна фаза робить матеріал крихким, а надмірний аустеніт — недостатньо твердим.

Таким чином, повний комплекс впливу на структуру легованих і високолегованих чавунів включає не лише легування і термічну обробку, а й металургійну чистоту розплаву, керування кристалізацією, модифікування, мікролегування, фізичні методи впливу (вібрація, електромагнітне перемішування, магнітне поле) і контроль режимів охолодження. Саме комбінація цих факторів дозволяє отримати потрібне співвідношення між карбідною твердістю, пластичністю матриці та експлуатаційною довговічністю матеріалу в різних умовах роботи.

### 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНИХ МОДИФІКАТОРІВ НА СПЕЦІАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛЕГОВАНИХ ЧАВУНІВ

#### 3.1. Експериментальна частина дослідження

У роботі досліджувався вплив модифікування чавуну кальційвмісними комплексними модифікаторами та модифікаторами на основі Ce+Y (церій+ітрій) на зносостійкість і корозійну стійкість чавуну, що містить 15% Cr; 1,3% C і 1,58% Si. Хімічний склад модифікаторів наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Хімічний склад модифікаторів

№	Вміст хімічних елементів, %							
	Si	Ca	Mg	Ce	Y	Al	Ba	Fe
1				40	20			
2	53	15,75	6,89	1,24		0,51		Залишок
3	46	12,85	12,59			0,34	7,43	
4	47	17,20	8,26			0,51		

Плавлення чавуну проводилося в індукційних печах місткістю до 30 кг з основною футеровкою. Модифікування здійснювалося при температурі 1580 °C безпосередньо в тиглі; модифікатор вводився в металевому дзвіночку. Метал після модифікування витримувався перед розливанням протягом 180 с. Остаточне розкислення металу перед модифікуванням проводилося алюмінієм із розрахунку введення його 0,15 мас.%.

Дослідження зносостійкості сплавів проводилося на машині тертя МІ-1М за схемою випробування «вкладиш–ролик» при  $P = 25\text{--}50 \text{ кгс/см}^2$  і  $v = 1,05 \text{ м/с}$ . Тертя здійснювалося у водному середовищі, час випробування – 150 хв. Корозійна стійкість чавуну досліджувалася гравіметричним методом у розчині з  $\text{pH} = 9,25$ .

Встановлено, що обробка чавуну всіма дослідженими модифікаторами підвищує його зносостійкість за всіх параметрів випробування. Відзначено підвищення стійкості як досліджуваного чавуну (вкладиш), так і спряженої сталі

2Х13Л (ролик). Причому дія першого і другого модифікаторів (табл. 3.2), до складу яких входять рідкісноземельні метали (ітрій, церій), більш помітна; зносостійкість чавуну при введенні цих модифікаторів підвищується у 2,8–3,5 рази при  $P = 25 \text{ кгс/см}^2$  і майже у 20 разів при  $P = 50 \text{ кгс/см}^2$ . Вплив кальційвмісного модифікатора також є досить суттєвим. Підвищення зносостійкості зумовлене впливом модифікувальних добавок на первинну і вторинну структури сплаву, а також його міцнісні й пластичні властивості.

Таблиця 3.2 – Вплив модифікування на спеціальні властивості чавуну

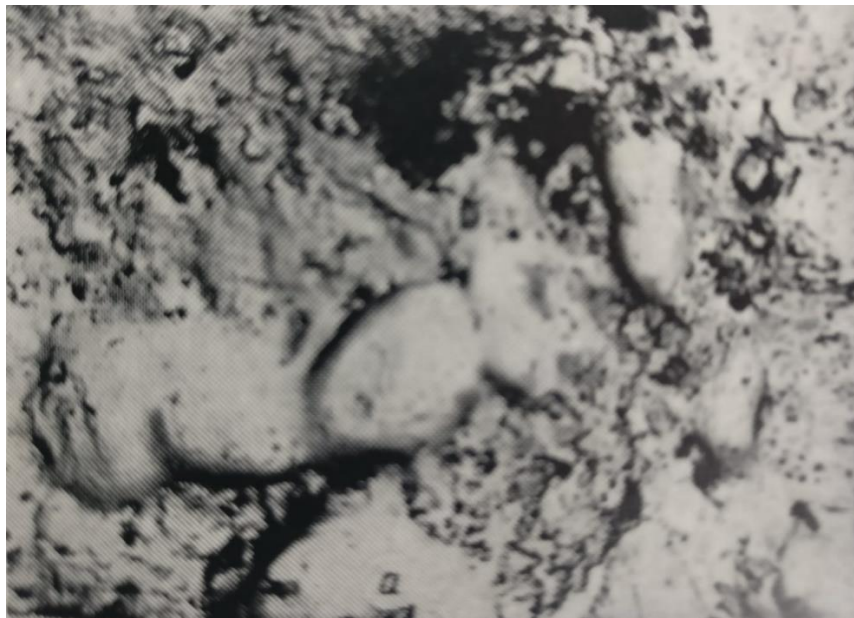
№ модифікатора	Зносостійкість, г/км			Корозійна стійкість в розчині рН = 9,25; швидкість корозії, г/(м <sup>2</sup> доб)
	Інтенсивність зношування при $P = 25 \text{ кгс/см}^2$		Інтенсивність зношування при $P = 50 \text{ кгс/см}^2$	
	ролик	вкладиш	вкладиш	
1	0,0186	0,0245	0,108	0,187
2	0,0376	0,0296	0,113	0,750
3	0,0189	0,0400	0,167	0,525
4	0,0440	0,425	0,125	0,800
немодифікований чавун	0,0186	0,0785	2,272	0,870

Зростає дисперсність основи та карбідних включень: **замість суцільно витягнутих голок з'являються подрібнені ланцюжки первинних карбідів, порушується суцільність карбідної сітки. Добавки Се і У впливають на форму вторинних карбідів, замість різко прямокутної вони набувають округлої форми (рис. 3.1).**

Подрібнення структури пов'язане з утворенням додаткових активних центрів кристалізації та адсорбцією добавок РЗМ. Цікавим є ступінь впливу кожного з цих факторів при використанні різних видів модифікаторів.

Дослідження розподілу введених добавок методами радіоактивних ізотопів із використанням  $\text{Ce}^{144}$  і сканування показало, що добавки РЗМ (Се) переважно концентруються по межах зерен. При модифікуванні змінюється кількість і форма неметалевих включень, з'являються двофазні оксисульфідні включення. У модифікованому чавуні збільшується кількість залишкового аустеніту, зростає

вміст карбиду  $Me_{23}C_6$  замість  $Me_7C_3$ , змінюється характеристика тонкої структури. Зазначені зміни значною мірою залежать від кількості введеного модифікатора.



а)



б)

Рис. 3.1. Вплив модифікування на форму карбідів  
а) – первинних, X 7000; б) – вторинних, X 5000

Оптимальним для Се є введення 0,17–0,25% (рис. 3.2)

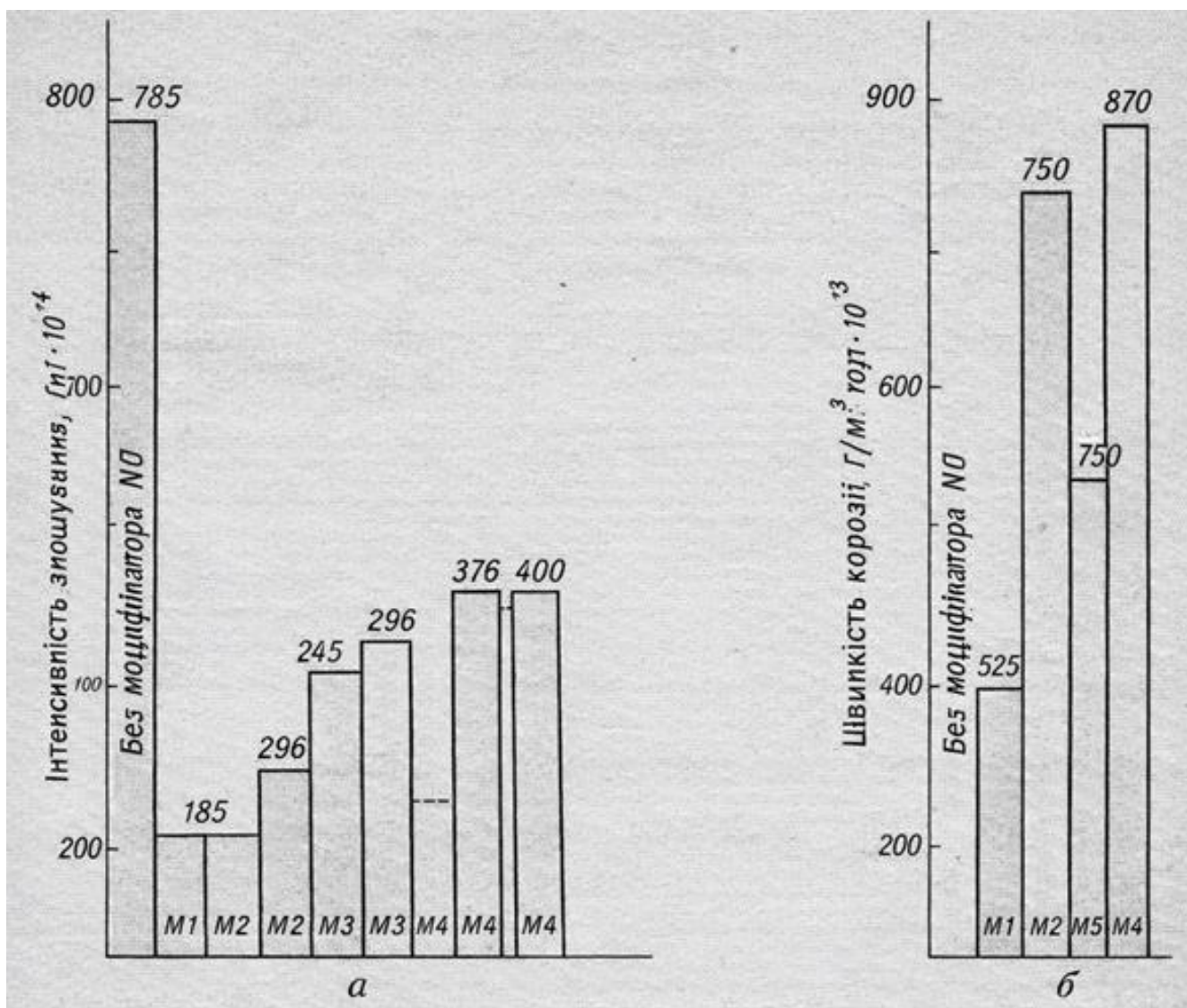


Рис. 3.2. Зміна спеціальних властивостей хромистого чавуну в залежності від кількості модифікатора: а – зносостійкість ( $P = 25$  кгс/см<sup>2</sup>); б – корозійна стійкість (рН = 9,25)

Така кількість модифікатора достатня для перебігу процесів рафінування і дегазації. При цьому основна частина добавок розташовується на межах зерен. Істотного підвищення гетерогенності структури за такої кількості РЗМ не спостерігається. При введенні добавок Y і Се у кількості понад 0,35–0,5% збільшується кількість неметалевих включень. Поява великих церійвмісних фаз призводить до зниження корозійної стійкості сплаву.

Модифікування змінює також структуру, що формується у деформованих при терті поверхневих шарах металу. Збільшується кількість зміцненого аустеніту (табл. 3.3).

Таблиця 3.3 – Вплив добавок церія на кількість аустеніту

Кількість уведеного церія, %	Кількість аустеніту в поверхні, %	
	вихідний	деформований
0	5	10
0,2	8	14
0,5	43	20

Зміцнений аустеніт у деформованому шарі утворюється інтенсивніше за наявності в початковій структурі залишкового аустеніту. Однак збільшення його понад 10–20% є менш бажаним, оскільки не сприяє різкому підвищенню властивостей.

Модифікування сприяє незначному збільшенню густини дислокацій у деформованій структурі, більш повному й швидкому перебігу перетворень. Великий вплив модифікатор має на інтенсивність дифузії і, як наслідок, на ефективний вміст легувального елемента в зерні. Встановлено, що модифікатори уповільнюють дифузію хрому і молібдену із зерна в карбіди при деформуванні та термічній обробці. Дифундуючий атом легувального елемента затримується на межі зерна.

Зазначені зміни у первинній і вторинній структурах підвищують спеціальні та механічні властивості сплавів. Зростає зносостійкість і корозійна стійкість легованих сплавів.

Модифікування хромистого чавуну комплексними модифікаторами на основі Са сприяє зміні структури сплаву, аналогічно добавкам Се і Y. Встановлено, що ці модифікатори за своєю дегазувальною і рафінувальною здатністю ефективніші, ніж церійвмісні. Вони також викликають помітну зміну зносостійкості сплавів (табл. 3.2), що, ймовірно, пов'язано саме з цими змінами. Вплив кальційвмісних модифікаторів на корозійну стійкість менш помітний. Очевидно, модифікатори такого типу менше впливають на інтенсивність дифузійних процесів і перерозподіл легувальних елементів у складових

структури. Таким чином, церійвмісні модифікатори більшою мірою проявляють інгібувальні властивості, а кальційвмісні – інокулювальні.

### **3.2. Обробка статистичних даних випробувань**

У задачах обробки експериментальних даних головною метою зазвичай є встановлення аналітичної залежності між змінними на основі вимірних значень, які майже завжди містять випадкові похибки. Тому замість точного відтворення кожної точки будують узагальнену функцію, яка відображає основну тенденцію процесу. Одним із базових підходів тут є метод найменших квадратів. Його суть полягає в тому, що серед усіх можливих функцій обраного типу (наприклад, лінійних чи поліноміальних) вибирається та, яка найкраще узгоджується з експериментальними даними в середньому, тобто мінімізує відхилення між експериментальними значеннями та розрахованими за моделлю. Цей метод є універсальним і лежить в основі більшості процедур регресійного аналізу.

Часто для опису залежностей використовують поліноми, оскільки вони є достатньо гнучкими і можуть наближати широкий клас функцій. Поліноміальна апроксимація дозволяє отримати просту аналітичну форму, зручну для подальшого аналізу, диференціювання чи інтегрування. Водночас важливо правильно обрати степінь полінома: занадто простий не відобразить реальну поведінку системи, а надто складний може почати описувати випадковий шум замість фізичної закономірності.

Іншим підходом є інтерполяція, коли функція будується так, щоб точно проходити через усі експериментальні точки. Такий підхід доцільний лише тоді, коли похибки вимірювань малі або ними можна знехтувати. У реальних експериментах це трапляється рідко, тому інтерполяційні методи частіше використовують для допоміжних обчислень, ніж для виявлення загальних закономірностей.

Більш загальним поняттям є регресійний аналіз, який включає побудову залежностей різного типу – не лише поліноміальних, а й експоненціальних,

логарифмічних чи інших, форма яких може визначатися теоретичними міркуваннями щодо природи досліджуваного явища. Вибір конкретної моделі зазвичай базується як на вигляді експериментальних даних, так і на фізичному змісті задачі.

Оскільки експериментальні дані часто містять випадкові коливання, перед побудовою моделі інколи застосовують процедури згладжування, які дозволяють виділити основний тренд і зменшити вплив шуму. Крім того, замість використання одного глобального полінома можуть застосовуватися кусочно-задані функції, зокрема сплайни, що забезпечують кращу стабільність і точність апроксимації на окремих ділянках.

Після побудови аналітичної залежності важливо оцінити її адекватність експериментальним даним. Для цього аналізують величину відхилень, а також перевіряють, наскільки добре модель відтворює загальну тенденцію. У підсумку поєднання цих методів дозволяє не лише формально підібрати функцію, а й отримати математичний опис, який має змістовну інтерпретацію і може бути використаний для прогнозування або подальшого теоретичного аналізу.

В роботі застосували найпростіший і найпоширеніший варіант – це Microsoft Excel. У ньому можна побудувати графік за експериментальними точками і додати лінію тренду, обравши тип залежності (лінійна, поліноміальна, експоненціальна тощо). Програма автоматично підбирає коефіцієнти за методом найменших квадратів і навіть виводить рівняння функції та коефіцієнт достовірності. Це робить Excel дуже зручним для швидкого аналізу без глибокого програмування.

Обробці підлягали дані табл. 3.1 і табл. 3.2. Було отримано наступні математичні моделі:

$$\text{знос} = 0,04 - 0,00026 \cdot (C_e + Y) \quad (3.1)$$

Перевірка:

- для модифікатора №1

$$\text{знос} = 0,04 - 0,00026 \cdot 60 = 0,04 - 0,0156 = 0,0244;$$

в експерименті маємо – 0,0245;

- для модифікатора №2

-

$$\text{знос} = 0,04 - 0,00026 \cdot 1,24 \approx 0,04 - 0,00032 = 0,0397;$$

в експерименті маємо – 0,0296.

Висновок: для першого складу модель працює дуже добре, для другого – вже ні. Це означає, що **одного церія (або Ce+Y) недостатньо**, щоб описати знос у другому складі сильно впливають інші елементи (Si, Ca, Mg).

Тому прийняли найпростішу двофакторну модель:

$$\text{знос} = 0,04 - 0,00026 \cdot (\text{Ce} + \text{Y}) + 0,0001 \cdot (\text{Si} + \text{Ca} + \text{Mg}), \quad (3.2)$$

яка вже дає задовільні результати для всіх чотирьох модифікаторів.

При обробці статистичних даних випробувань корозійної стійкості високохромистого чавуну була отримана така нелінійна модель:

$$K = 0,187 + 0,030 \cdot R - 0,00045 \cdot R^2, \quad (3.3)$$

$$\text{де } R = \frac{\text{Si} + \text{Ca} + \text{Mg}}{\text{Ce} + \text{Y} + \text{Al} + 1}$$

Дана модель дала задовільні результати.

## **Висновок**

Проведені дослідження показали, що для деталей із хромистих і хромомолібденових чавунів, які працюють у складних умовах одночасного впливу тертя та агресивних середовищ, доцільно застосовувати добавки Се і Y у кількості 0,2–0,3%. При терті без наявності агресивного середовища раціонально використовувати дешевші й більш поширені комплексні модифікатори на основі Са.

## Список літератури

1. Бялік Г.А., Наумик В.В., Луньов В.В., Пархоменко А.В. Теорія ливарних сплавів. Навчальний посібник. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. – 156 с. – ISBN: 978-617-529-068-2.
2. Астапова Г.В. Матеріалознавство та основи технології переробки природної сировини у непродовольчі товари. Навчальний посібник/ [Г. В. Астапова, К. А. Астапова, Л. Г. Саркісян та ін.] – К.: Центр учбової літератури, 2009. – 120 с. – ISBN: 978-966-364-866-8.
3. Бурак М.П., Рищенко Т.Д. Будівельне матеріалознавство. Навч. посібник. – Харків: ХНАМГ, 2007. – 126 с.
4. Афтандіянц Є.Г., Зазимко О.В., Лопатько К.Г., Похиленко Г.М. Матеріалознавство, технологія конструкційних матеріалів і машинобудування. Українсько-англійський тлумачний словник у 2-х книгах. Книга 2. О-Я Тлумачний словник. – Київ: Національний університет біоресурсів і природокористування України (НУБіП України), Видавничий центр НУБіП України, 2018. - 770 с.
5. Кшнякін В.С., Опанасюк А.С., Дядюра К.О. Основи фізичного матеріалознавства. У двох частинах. Частина 2. Навчальний посібник. – Суми : Сумський державний університет, 2015.– 291 с. ISBN: 978-966-657-586-2 ISBN: 978-966-657-588-6.
6. Поплавко, Ю.М., Переверзева Л.П., Воронов С.А., Якименко Ю.І. Фізичне матеріалознавство. Частина 2. Діелектрики. – К.: НТУУ «КПІ», 2007. — 392 с.
7. Бузило В.І., Сердюк В.П., Яворський А. В, Гайдай О.А. Матеріалознавство Навчальний посібник. – Дніпро: Дніпровська політехніка, 2021. — 243 с.