

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Механіко-технологічний факультет

Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«ДОПУЩЕНО ДО ЗАХИСТУ»

Зав. кафедрою МЛВ

к.т.н. доцент

_____ Олександр КУЗИК

“ _____ ” _____ 2025 року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем
вищої освіти

на тему:

**«Вплив модифікування комплексними лігатурами
на морфологію графіту та механічні властивості
високоміцного чавуну»**

«The effect of modification with complex ligatures on the morphology of graphite and the
mechanical properties of high-strength cast iron»

Виконав здобувач вищої освіти:

II курсу, групи ПМ-24М-1

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 Прикладна механіка

_____ Микита БАРКАР

Керівник роботи:

к.т.н., доцент _____ Олександр КУЗИК

Рецензент: _____

Центральноукраїнський національний технічний університет

Механіко-технологічний факультет

Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти _____ магістр _____

Галузь знань 13 Механічна інженерія

Спеціальність 131 "Прикладна механіка"

Освітньо-професійна програма «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри _____

к.т.н. доцент, Олександр КУЗИК

“ ____ ” _____ 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗА ДРУГИМ
(МАГІСТЕРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ
ОСВІТИ**

Баркара Микити Миколайовича

1. Тема роботи: "Вплив модифікування комплексними лігатурами на морфологію графіту та механічні властивості високоміцного чавуну"

2. Керівник роботи Кузик Олександр Володимирович, кандидат технічних наук, доцент

Затверджені наказом вищого навчального закладу від "04"серпня 2025 року № 23-13

3. Строк подання роботи до захисту "9" грудня 2025 року

4. Мета кваліфікаційної роботи – дослідження впливу комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на морфологію графіту та механічні властивості високоміцного чавуну.

Завдання роботи:

– проаналізувати літературні дані щодо механізмів формування вермикулярної морфології графіту у високоміцних чавунах та ролі модифікувальних елементів;

– дослідити вплив умов модифікування, залишкового вмісту магнію і сірки, а також масивності відливок на морфологію графітових включень;

– провести порівняльний аналіз структури високоміцного чавуну після магнієвого та комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 з використанням методів металографічних досліджень;

– встановити взаємозв'язок між морфологією графітових включень та механічними властивостями високоміцного чавуну;

– оцінити вплив комплексного модифікування на механічні властивості та обґрунтувати доцільність застосування комплексних лігатур для забезпечення стабільності властивостей матеріалу.

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 магістерської роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Розділ 1	02.10	
2	Розділ 2	23.10	
3	Розділ 3	22.11	
4	Презентаційний матеріал	05.12	

Дата видачі завдання

«2» 09 2025 року

Керівник роботи

_____ Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

«_____» _____ 2025 року

_____ Микита БАРКАР

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну магістерську роботу виконав здобувач вищої освіти Баркар Микита Миколайович студент II курсу, групи ПМ-24М-1, ОПП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка на тему "Вплив модифікування комплексними лігатурами на морфологію графіту та механічні властивості високоміцного чавуну", яка складається з пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу. Пояснювальна записка містить 65 сторінок тексту, формату А4, 20 рисунків, 8 таблиць. Ілюстративний матеріал містить 10 слайдів.

У магістерській роботі досліджено вплив модифікування комплексними лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на морфологію графітових включень та механічні властивості високоміцного чавуну. Показано, що морфологія графіту є визначальним структурним чинником, який формує механічні властивості матеріалу та характер його руйнування.

У роботі виконано аналіз сучасних літературних джерел, присвячених механізмам формування вермикулярної форми графіту та ролі модифікувальних елементів. Експериментально досліджено вплив умов модифікування, залишкового вмісту магнію і сірки, а також масивності відливок на формування морфології графітових включень. Проведено порівняльний аналіз структури та властивостей високоміцного чавуну після традиційного магнієвого та комплексного модифікування з використанням методів металографічних і механічних випробувань.

Встановлено, що застосування комплексних лігатур ФСМг–ФС30РЗМ30 забезпечує більш стабільне формування вермикулярної морфології графіту, знижує чутливість структури до умов твердіння та масивності відливок і сприяє підвищенню відтворюваності механічних властивостей. Показано, що комплексне модифікування дозволяє підвищити межу міцності при розтягуванні без надмірного зростання твердості та забезпечує більш сприятливий, в'язко-пластичний характер руйнування матеріалу.

Отримані результати мають практичне значення для удосконалення технології виготовлення виливків з високоміцного чавуну та можуть бути використані при виборі модифікувальних матеріалів для забезпечення стабільних структурних і механічних характеристик виробів.

Ключові слова: високоміцний чавун, комплексне модифікування, вермикулярний графіт, морфологія графіту, механічні властивості, магній, рідкоземельні елементи.

ABSTRACT

The qualification master's thesis was completed by the higher education applicant Barkar Mykyta Mykolayovych, a second-year student, group PM-24M-1, OPP "Applied Mechanics", specialty 131 Applied Mechanics, on the topic "The influence of modification with complex ligatures on the morphology of graphite and mechanical properties of high-strength cast iron", which consists of an explanatory note and illustrative material. The explanatory note contains 65 pages of text, A4 format, 20 figures, 8 tables. The illustrative material contains 10 slides.

The master's thesis investigated the influence of modification with complex ligatures FSMg–FS30RZM30 on the morphology of graphite inclusions and mechanical properties of high-strength cast iron. It is shown that the morphology of graphite is a determining structural factor that shapes the mechanical properties of the material and the nature of its fracture.

The paper analyzes modern literature on the mechanisms of vermicular graphite formation and the role of modifying elements. The influence of modification conditions, residual magnesium and sulfur content, and casting bulkiness on the formation of graphite inclusion morphology was experimentally investigated. A comparative analysis of the structure and properties of high-strength cast iron after traditional magnesium and complex modification was carried out using metallographic and mechanical testing methods.

It was established that the use of complex ligatures FSMg–FS30RZM30

provides a more stable formation of vermicular graphite morphology, reduces the sensitivity of the structure to solidification conditions and casting bulkiness, and contributes to an increase in the reproducibility of mechanical properties. It is shown that complex modification allows to increase the tensile strength without excessive increase in hardness and provides a more favorable, visco-plastic nature of material fracture.

The results obtained have practical significance for improving the technology of manufacturing high-strength cast iron castings and can be used in the selection of modifying materials to ensure stable structural and mechanical characteristics of products.

Keywords: high-strength cast iron, complex modification, vermicular graphite, graphite morphology, mechanical properties, magnesium, rare earth elements.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ФОРМУВАННЯ МОРФОЛОГІЇ ГРАФІТУ У ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНАХ.....	9
1.1 Високоміцні чавуни як конструкційні матеріали та особливості їх застосування.....	9
1.2 Форми графітових включень у чавунах та методи їх класифікації.....	10
1.3 Вермикулярний графіт як окремий структурний стан високоміцних чавунів.....	18
Висновки до розділу 1.....	23
РОЗДІЛ 2. ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ВЕРМИКУЛЯРНОЇ ФОРМИ ГРАФІТУ У ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНАХ... ..	26
2.1 Застосування та загальні технологічні принципи одержання високоміцного чавуну.....	26
2.2 Аналіз модифікувальних матеріалів для одержання чавуну з вермикулярною формою графіту.....	29
2.3 Вплив залишкового вмісту магнію на морфологію графіту.....	35
2.4 Механізм формування вермикулярного графіту в магнієвих чавунах.....	37
2.5 Роль домішкових елементів у формуванні вермикулярної форми графіту.	41
2.6 Методика дослідження мікроструктури чавунів.....	43
Висновки до розділу 2.....	46
РОЗДІЛ 3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФІКУВАННЯ НА МОРФОЛОГІЮ ГРАФІТУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ.....	47
3.1 Характеристика комплексних модифікуючих лігатур та умови проведення модифікування.....	47
3.2 Вплив комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30Р3М30 на морфологію графіту.....	52
3.3 Вплив комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30Р3М30 на механічні властивості високоміцного чавуну.....	56
Висновки до розділу 3.....	59
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	61
Список використаних джерел.....	63

ВСТУП

Високоміцні чавуни належать до класу конструкційних матеріалів, які широко застосовуються у машинобудуванні, енергетиці та транспортному машинобудуванні завдяки поєднанню високих механічних властивостей, доброї ливарної технологічності та відносно низької собівартості. Ключовим чинником, що визначає комплекс властивостей таких чавунів, є морфологія графітових включень, яка істотно впливає на характер напружено-деформованого стану металевої матриці та механізми руйнування матеріалу.

Серед різних форм графіту особливе місце займає вермикулярна морфологія, яка забезпечує більш сприятливий розподіл напружень у матриці порівняно з пластинчастим графітом і водночас не потребує жорсткого контролю технологічних параметрів, характерного для отримання кулястого графіту. Чавуни з вермикулярною формою графіту поєднують підвищену міцність, достатню пластичність і добрі теплофізичні властивості, що робить їх перспективними матеріалами для виготовлення відповідальних виливків складної конфігурації.

Разом з тим, формування стабільної вермикулярної морфології графіту є складним технологічним завданням. Відомо, що утворення даної форми графіту відбувається у надзвичайно вузькому інтервалі залишкового вмісту магнію та характеризується високою чутливістю до вмісту сірки, температури обробки розплаву та умов твердіння відливок. У промислових умовах це часто призводить до структурної нестабільності, появи суміші вермикулярних і кулястих включень графіту та значного розсіювання механічних властивостей.

Традиційне магнієве модифікування, яке широко застосовується для отримання високоміцних чавунів, не завжди забезпечує відтворюваність морфології графіту, особливо у випадку виливків з підвищеною масивністю, де зменшення швидкості охолодження сприяє деградації структури. У зв'язку з цим

зростає інтерес до застосування комплексних модифікувальних лігатур, що поєднують магній з іншими активними елементами, зокрема рідкоземельними металами.

Комплексне модифікування дозволяє впливати не лише на процес сфероїдизації графіту, але й на хімічні та дифузійні процеси в розплаві, знижувати негативний вплив домішкових елементів та розширювати технологічний інтервал стабільного формування вермикулярної морфології графіту. Водночас питання ефективності таких лігатур, їх впливу на морфологію графітових включень та механічні властивості високоміцного чавуну, а також взаємозв'язок між структурними змінами і умовами твердіння залишаються недостатньо вивченими.

У зв'язку з цим актуальним є проведення комплексних експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку впливу модифікування комплексними лігатурами на формування морфології графіту та механічні властивості високоміцного чавуну. Особливу увагу доцільно приділити порівняльному аналізу традиційного магнієвого та комплексного модифікування, а також вивченню стабільності отриманих структурних і механічних характеристик.

З огляду на зазначене, дана магістерська робота присвячена дослідженню впливу комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на морфологію графіту та механічні властивості високоміцного чавуну, що має важливе наукове та практичне значення для підвищення відтворюваності властивостей литих виробів і розширення можливостей промислового застосування чавунів з вермикулярною формою графіту.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ ФОРМУВАННЯ МОРФОЛОГІЇ ГРАФІТУ У ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНАХ

1.1 Високоміцні чавуни як конструкційні матеріали та особливості їх застосування.

Високоміцні чавуни займають важливе місце серед сучасних конструкційних матеріалів завдяки поєднанню задовільних механічних властивостей, технологічності лиття та відносно низької собівартості виготовлення виробів складної форми. На відміну від сталей, чавуни дозволяють отримувати готові деталі з мінімальним обсягом подальшої механічної обробки, що зумовлює їх широке застосування в машинобудуванні, енергетиці, автомобільній та транспортній галузях.

Ключовою особливістю високоміцних чавунів є наявність у їх структурі вільного вуглецю у вигляді графітових включень, форма, розміри та просторовий розподіл яких істотно впливають на механічні, теплофізичні та експлуатаційні властивості матеріалу. Саме морфологія графіту визначає рівень концентрації напружень у металевій матриці, характер руйнування, здатність матеріалу до демпфування коливань та теплопровідність.

Залежно від форми графітових включень розрізняють чавуни з пластинчастим, вермикулярним та кулястим графітом. Чавуни з пластинчастою формою графіту характеризуються високою ливарною технологічністю та добрими антифрикційними властивостями, проте наявність гострокутних графітових пластин зумовлює значну концентрацію напружень і обмежує рівень їх міцності та пластичності. У свою чергу, високоміцні чавуни з кулястим графітом відрізняються підвищеними значеннями міцності, відносного подовження та ударної в'язкості, що наближає їх за властивостями до вуглецевих сталей.

Проміжне положення між зазначеними структурними станами займають чавуни з вермикулярною формою графіту, які поєднують порівняно високі міцнісні характеристики з покращеними теплофізичними та демпфувальними властивостями. Така комбінація робить їх перспективними матеріалами для деталей, що працюють в умовах змінних теплових і механічних навантажень. У порівнянні з чавунами з кулястим графітом, чавуни з вермикулярним графітом мають вищу теплопровідність та меншу чутливість до термічних напружень, а в порівнянні з чавунами з пластинчастим графітом — значно вищу міцність і тріщиностійкість.

Практика промислового застосування показує, що високоміцні чавуни широко використовуються для виготовлення корпусних деталей, блоків циліндрів, головок двигунів внутрішнього згоряння, елементів вихлопних систем, деталей компресорів, насосів та інших вузлів, де необхідне поєднання механічної міцності, теплової стабільності та вібродемпфувальних властивостей. При цьому зростаючі вимоги до надійності та ресурсу машин стимулюють розвиток технологій керування структурою чавунів шляхом регулювання форми графітових включень.

Таким чином, високоміцні чавуни слід розглядати не як однорідну групу матеріалів, а як систему структурних станів, властивості яких визначаються, насамперед, морфологією графіту та характером металевої матриці. Це зумовлює актуальність детального аналізу форм графітових включень, методів їх ідентифікації та умов формування, що є необхідною передумовою для подальшого дослідження механізмів керування структурою і властивостями чавунів.

1.2 Форми графітових включень у чавунах та методи їх класифікації.

Форма графітових включень є одним із визначальних структурних чинників, що формує комплекс механічних, теплофізичних та експлуатаційних властивостей чавунів. Графіт, будучи неметалевою фазою, виконує роль

внутрішнього структурного елемента, який одночасно впливає на концентрацію напружень у металевій матриці, механізми руйнування та здатність матеріалу до релаксації напружень. У зв'язку з цим коректна ідентифікація форми графіту та її кількісна оцінка є необхідною умовою аналізу структури високоміцних чавунів.

Найбільш поширеною у світовій практиці є класифікація форм графітових включень, регламентована міжнародним стандартом ISO 945-1:2008, згідно з яким графіт у чавунах поділяють за ступенем компактності на шість основних форм. У межах цієї класифікації принципове значення для високоміцних чавунів мають пластинчаста форма графіту (форма I), вермикулярна форма (форма III) та сфероїдальна форма (форма VI), які відображають еволюцію графітної фази залежно від умов кристалізації та ефективності модифікуючої дії елементів. Узагальнена схема форм графітових включень відповідно до стандарту ISO 945-1:2008 наведена на рис. 1.1.

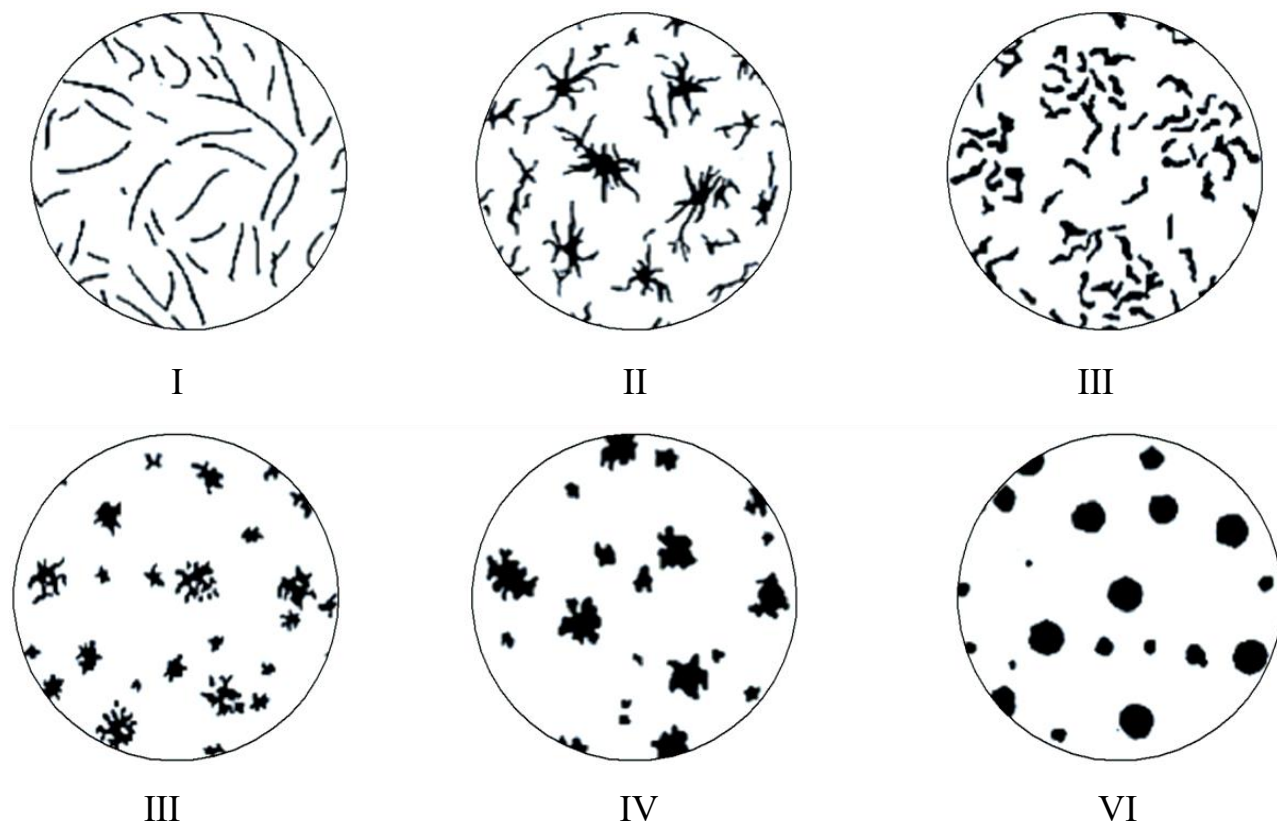


Рисунок 1.1 – Форми графітових включень згідно стандарту

ISO 945-1: 2008

Для більш детальної та кількісної характеристики вермикулярної морфології графіту використовується уточнена класифікація, запропонована стандартом ISO 16112:2006, яка базується на аналізі геометричних параметрів графітових включень. Згідно з цим стандартом, включення графіту з характерним розміром понад 10 мкм класифікують за значенням фактора форми округлості RSF, що дозволяє кількісно оцінити ступінь компактності графіту (табл. 1.1, табл. 1.2).

Таблиця 1.1 – Форми графітових включень в ЧВГ згідно ISO 16112: 2006

Фактор округлості RSF	Форма графіту
0,625...1	Кулястий графіт (ISO форма VI)
0,525...0,625	Проміжна форма графіту (ISO форма IV і V)
<0,525	ВГ (ISO форма III)

У таблиці 1.1 наведено класифікацію форм графітових включень у високоміцних чавунах з компактними формами графіту відповідно до вимог стандарту ISO 16112:2006, яка базується на значенні фактора округлості RSF (Roundness Shape Factor). Даний параметр є кількісним критерієм оцінки морфології графітових включень і дозволяє об'єктивно розмежувати кулясту, проміжну та вермикулярну форми графіту.






Значення RSF у межах 0,625...1 відповідає кулястій формі графіту (ISO форма VI), яка характеризується мінімальним надрізуючим впливом на металеву матрицю та забезпечує найвищі показники міцності й пластичності високоміцного чавуну. Такі включення мають близьку до ізотропної форму та рівномірно розподіляють напруження в об'ємі матриці.

Інтервал $RSF = 0,525...0,625$ відповідає проміжній формі графіту (ISO форми IV і V), яка займає перехідне положення між кулястою та вермикулярною морфологіями. Для таких включень характерна часткова втрата сферичності, поява витягнутих або злегка розгалужених контурів, що супроводжується помірним зростанням концентрації напружень у матриці порівняно з кулястим графітом.

За значень $RSF < 0,525$ графітові включення класифікуються як вермикулярні (ISO форма III). Для цієї морфології характерні укорочені, потовщені та розгалужені включення з округленими краями, які займають проміжне положення між пластинчастим і кулястим графітом за своїм впливом на властивості матеріалу. Вермикулярний графіт знижує надрізуючу дію включень порівняно з пластинчастим графітом, але водночас не забезпечує такого рівня пластичності, як куляста форма.

Таким чином, використання фактора округлості RSF дозволяє перейти від якісної візуальної оцінки морфології графіту до кількісної класифікації форм графітових включень, що є необхідною умовою для коректного аналізу впливу умов модифікування на структуру та механічні властивості високоміцного чавуну.

Таблиця 1.2 – Включення вермикулярного графіту згідно стандарту ISO 16112: 2006

RSF – фактор округлості	Включення графіту
0,725	
0,625...0,725	
0,525...0,625	
0,425..0,525	
0,425	

У таблиці 1.2 наведено деталізовану класифікацію включень вермикулярного графіту відповідно до стандарту ISO 16112:2006, яка

базується на значенні фактора округлості **RSF** та відображає поступову зміну морфології графітових включень у межах вермикулярного структурного стану.

Значення **RSF** $\geq 0,725$ відповідають включенням графіту, морфологія яких наближається до кулястої. Такі включення характеризуються високою компактністю та мінімальним ступенем розгалуження, однак у межах класифікації ISO 16112 вони ще можуть розглядатися як перехідні щодо вермикулярної форми за умови обмеженої кількості кулястих включень у структурі.

Інтервал **RSF=0,625...0,725** відповідає компактним формам вермикулярного графіту з частковими ознаками сфероїдизації. Для таких включень характерна укорочена, потовщена форма з округленими краями, що забезпечує знижений надрізуючий вплив на металеву матрицю та сприяє формуванню сприятливого поєднання міцності й пластичності.

За значень **RSF = 0,525...0,625** вермикулярний графіт набуває більш вираженої витягнутої та розгалуженої морфології. У таких включеннях спостерігається зменшення ступеня компактності та збільшення надрізуючого впливу порівняно з більш округленими формами, однак він залишається істотно нижчим, ніж у випадку пластинчастого графіту.

Інтервал **RSF = 0,425...0,525** відповідає менш компактним включенням вермикулярного графіту з розвиненою розгалуженою структурою. Такі включення характеризуються підвищеною анізотропією форми та більшою чутливістю до умов твердіння, що може негативно впливати на стабільність механічних властивостей чавуну.

За значень **RSF < 0,425** вермикулярний графіт набуває морфології, близької до пластинчастої, з різко вираженою витягнутістю та нерівномірною формою. У межах стандарту ISO 16112 такі включення розглядаються як граничний випадок вермикулярної морфології та свідчать про недостатню ефективність модифікування або порушення умов формування структури.

Таким чином, представлена у таблиці 1.2 градація значень фактора округлості **RSF** дозволяє кількісно охарактеризувати ступінь розвитку

вермикулярної морфології графіту та використовується для об'єктивної оцінки ефективності модифікування, стабільності структури і прогнозування механічних властивостей високоміцного чавуну.

Схематичне зображення визначення фактора форми округлості RSF наведено на рис. 1.2.

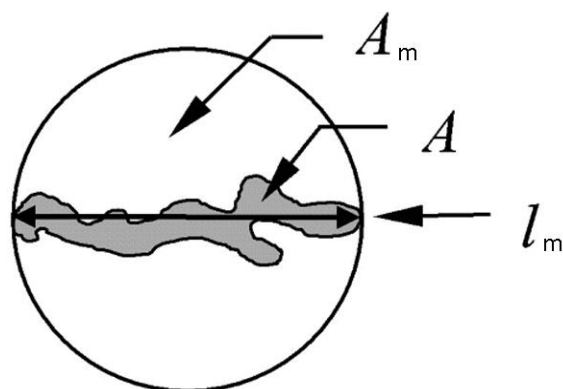


Рисунок 1.2 – Схема визначення фактора форми округлості включень графіту

На рис. 1.2 наведено схему визначення фактора форми округлості графітових включень, який використовується для кількісної оцінки морфології графіту в чавунах з різною формою графітових включень. Даний показник дозволяє об'єктивно охарактеризувати ступінь відхилення реальної форми включення від ідеально кулястої та широко застосовується при аналізі структури чавунів з вермикулярною та кулястою формами графіту.

Фактор округлості визначається на основі геометричних параметрів окремого графітового включення і розраховується як відношення площі круга з діаметром, що відповідає максимальній осі включення, до фактичної площі графітового включення. При цьому для ідеально кулястої форми значення фактора округлості наближається до одиниці, тоді як для витягнутих або розгалужених форм графіту характерні менші значення цього показника.

Згідно з міжнародним стандартом ISO 16112, фактор форми округлості використовується для розмежування кулястої, вермикулярної та проміжних форм графіту. Зменшення значення фактора округлості свідчить про перехід від компактних форм графіту до більш витягнутих і розгалужених морфологій, що

супроводжується зростанням надрізуючого впливу графітових включень на металеву матрицю.

Таким чином, застосування фактора форми округлості дозволяє перейти від якісного візуального опису морфології графіту до кількісної оцінки, що є необхідною умовою для коректного аналізу впливу технологічних параметрів модифікування на структурний стан і властивості чавуну.

Окрім фактора округлості, для оцінки структури чавунів з вермикулярною формою графіту застосовується показник ступеня сфероїдизації графіту (ССГ), який відображає відносну частку кулястих і проміжних форм графіту в загальній площі включень. Типові мікроструктури чавуну з різними значеннями ССГ наведені на рисунку 1.3, що дозволяє наочно простежити зміну морфології графітових включень при варіюванні умов формування структури.

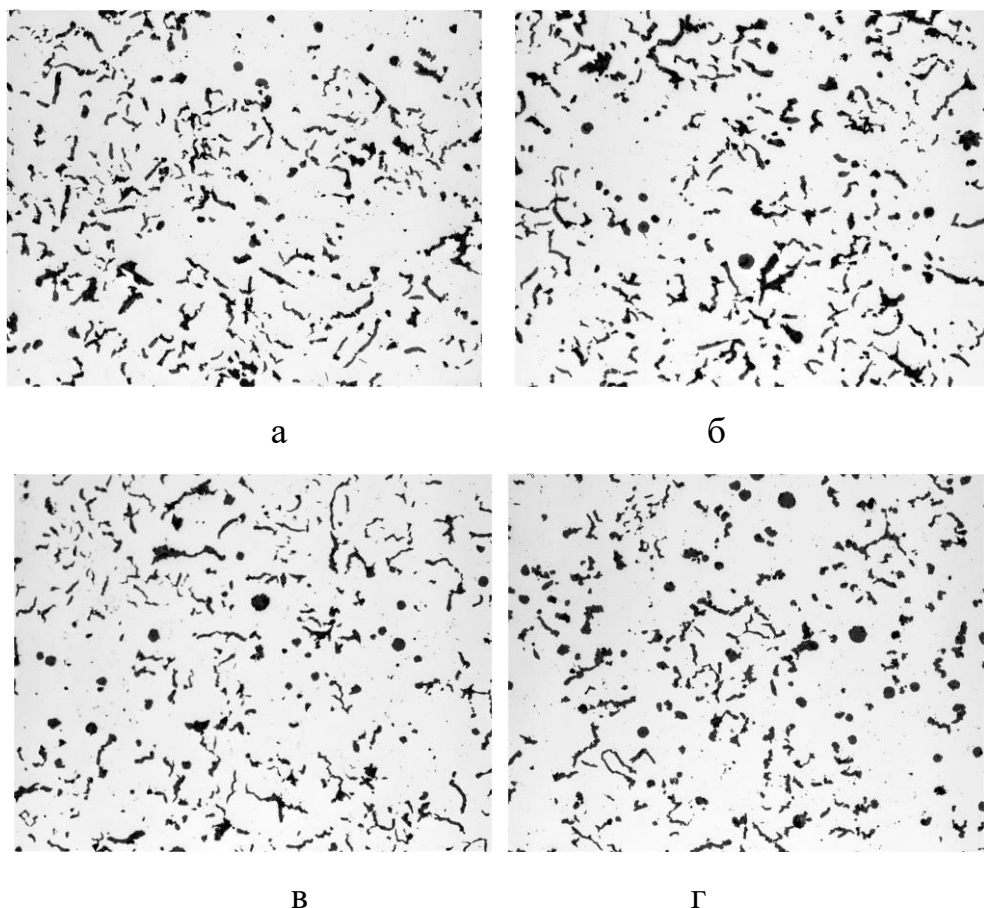


Рисунок 1.3 – Мікроструктури чавуну з вермикулярним графітом за шкалою ISO 16112: 2006:

а) – 5% ССГ, б) – 10% ССГ, в) – 15% ССГ, г) – 20% ССГ, х 100.

На рисунку 1.3 наведено характерні мікроструктури високоміцного чавуну з вермикулярною формою графіту відповідно до шкали стандарту ISO 16112:2006 за різного значення ступеня сфероїдизації графіту (ССГ). Представлені мікроструктури ілюструють поступову зміну морфології графітових включень у межах вермикулярного структурного стану залежно від частки компактних форм графіту.

За ССГ $\approx 5\%$ (рис. 1.3, а) у структурі переважають типові вермикулярні включення з вираженою розгалуженою та витягнутою формою. Такі включення характеризуються низьким ступенем компактності та порівняно підвищеним надрізуючим впливом на металеву матрицю, що відповідає нижній межі стабільного формування вермикулярного графіту.

При ССГ $\approx 10\%$ (рис. 1.3, б) спостерігається зростання частки більш компактних вермикулярних включень з округленими краями та зменшенням ступеня розгалуження. Морфологія графіту у цьому випадку є більш стабільною та сприятливою з точки зору поєднання міцності і пластичності матеріалу.

За ССГ $\approx 15\%$ (рис. 1.3, в) у структурі чавуну формується оптимальне співвідношення вермикулярних і компактних форм графіту. Включення характеризуються укороченою, потовщеною формою з мінімальним надрізуючим впливом у межах вермикулярного структурного стану, що забезпечує найбільш сприятливі механічні властивості.

Подальше зростання ССГ до $\approx 20\%$ (рис. 1.3, г) супроводжується появою значної кількості включень, морфологія яких наближається до кулястої. Такий структурний стан свідчить про тенденцію до переходу від вермикулярної морфології графіту до сфероїдальної, що є ознакою надмірної модифікувальної дії магнію або порушення оптимальних умов формування ВГ.

Таким чином, рисунок 1.3 наочно демонструє, що ступінь сфероїдизації графіту є чутливим кількісним показником, який дозволяє оцінити стабільність вермикулярної морфології та контролювати граничний перехід від вермикулярної до кулястої форми графіту у високоміцних чавунах.

Відповідно до вимог стандарту ISO 16112:2006, наявність пластинчастого графіту в структурі чавуну з вермикулярною формою графіту не допускається, тому такі включення не враховуються при проведенні структурного аналізу. Це положення є принциповим при оцінці ефективності модифікування та дозволяє розглядати вермикулярний графіт як керований структурний стан, а не як дефект кристалізації.

Практична ідентифікація форм графітових включень здійснюється методами металографічного аналізу на полірованих зразках. Визначення RSF та ССГ може проводитись шляхом ручного точкового підрахунку, порівняння з еталонними картами структури, а також із застосуванням автоматизованих систем аналізу зображень. Для забезпечення достовірності результатів регламентується мінімальна площа поля дослідження та роздільна здатність цифрових зображень, що забезпечує коректний облік форми, розмірів і розподілу графітових включень.

Таким чином, застосування стандартів ISO 945-1 і ISO 16112 у поєднанні з кількісними показниками RSF і ССГ формує надійну методологічну основу для аналізу морфології графіту у високоміцних чавунах, що є необхідною передумовою для подальшого розгляду вермикулярного графіту як окремого структурного стану.

1.3 Вермикулярний графіт як окремий структурний стан високоміцних чавунів.

Вермикулярний графіт посідає особливе місце серед морфологічних форм графітових включень у чавунах, оскільки не є ані дефектом кристалізації, ані нестійкою перехідною формою між пластинчастим і кулястим графітом. Його формування відповідає специфічному структурному стану високоміцних чавунів, який реалізується за певного поєднання хімічного складу та умов кристалізації і характеризується власним комплексом фізико-механічних властивостей.

Історично вермикулярний графіт був уперше зафіксований під час спроб отримання високоміцного чавуну з кулястим графітом, коли повна сфероїдизація вуглецю не досягалася. У таких випадках у структурі формувалися потовщені, укорочені графітові включення, які в англомовній літературі отримали назви *thick flake graphite* або *quasi-flake graphite*. Як самостійний різновид високоміцних чавунів чавун з вермикулярною формою графіту був науково описаний у 1948 році Morrogh H. та Williams W., які звернули увагу на характерні обриси випадкових перерізів графітових включень, що нагадують звивисті, червоподібні контури (рис. 1.4).

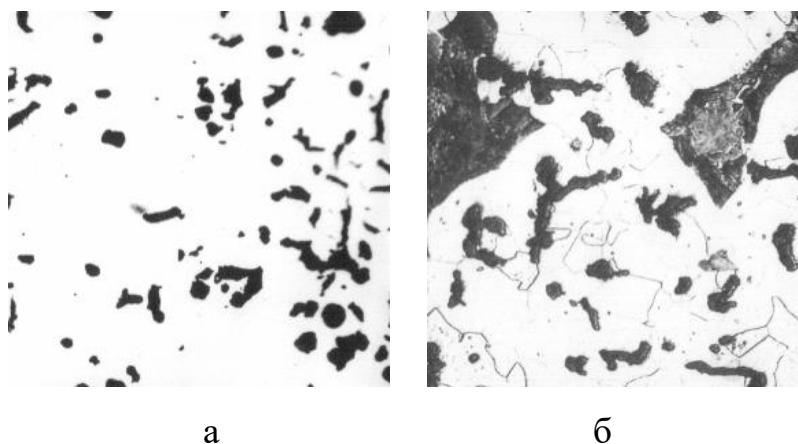


Рисунок 1.4 – Металографічна структура чавуну з вермикулярною формою графіту: не травленого (а) та травленого зразків (б); x150

З морфологічної точки зору вермикулярний графіт характеризується укороченими та потовщеними включеннями з округленими краями, що зумовлює зменшення їх надрізуючого впливу на металеву матрицю. Відношення довжини до товщини таких включень займає проміжне положення між кулястим і пластинчастим графітом та, як правило, знаходиться в інтервалі $l/h = 2 \dots 10$. На відміну від пластинчастого графіту, включення вермикулярної форми не мають одного переважного напрямку росту та характеризуються складною, розгалуженою конфігурацією.

Дослідження просторової будови вермикулярного графіту, виконані з використанням глибокого травлення та методів растрової електронної мікроскопії, показали, що окремі графітові фрагменти в межах евтектичної

колонії є взаємопов'язаними та формують тривимірну «коралоподібну» структуру (рис. 1.5). Така будова зумовлює більш рівномірний розподіл напружень у металевій матриці порівняно з пластинчастим графітом, що позитивно відбивається на тріщиностійкості матеріалу.

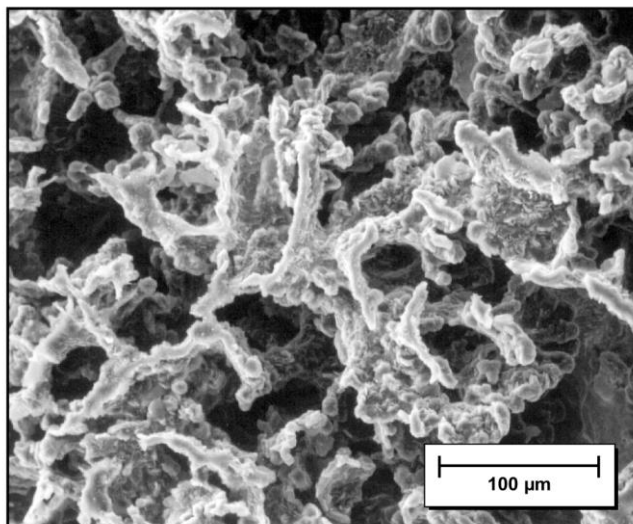


Рисунок 1.5 – Просторова будова вермикулярного графіту

На рисунку 1.5 наведено схематичне уявлення про просторову будову вермикулярного графіту у високоміцному чавуні. На відміну від пластинчастого графіту, який формує практично двовимірні лускоподібні включення, та кулястого графіту, що складається з ізольованих компактних частинок, вермикулярний графіт має складну тривимірну розгалужену структуру.

Вермикулярні включення являють собою систему взаємопов'язаних графітових фрагментів, які формують просторову «коралоподібну» або «червоподібну» конфігурацію в межах евтектичних колоній. Окремі ділянки таких включень з'єднані між собою тонкими перемичками, що зумовлює часткову безперервність графітної фази при відсутності чітко виражених плоских поверхонь росту, характерних для пластинчастого графіту.

Така просторова будова вермикулярного графіту забезпечує більш рівномірний розподіл напружень у металевій матриці порівняно з пластинчастими включеннями та зменшує локальну концентрацію напружень на межі «графіт–матриця». Водночас наявність розгалуженої структури та

часткової зв'язаності графітових включень зумовлює дещо більший надрізуючий вплив порівняно з ізольованими кулястими включеннями.

Таким чином, просторова будова вермикулярного графіту визначає його проміжний характер між пластинчастою та кулястою формами та є однією з ключових причин специфічного поєднання механічних і теплофізичних властивостей чавунів з вермикулярною формою графіту.

Порівняльний аналіз морфології графітових включень показує, що вермикулярний графіт, зберігаючи витягнуту форму, подібну до пластинчастого графіту, істотно відрізняється від нього за геометрією країв. Краї включень вермикулярного графіту є більш згладженими та округленими, що знижує локальну концентрацію напружень і сприяє підвищенню міцності чавуну (рис. 1.6).

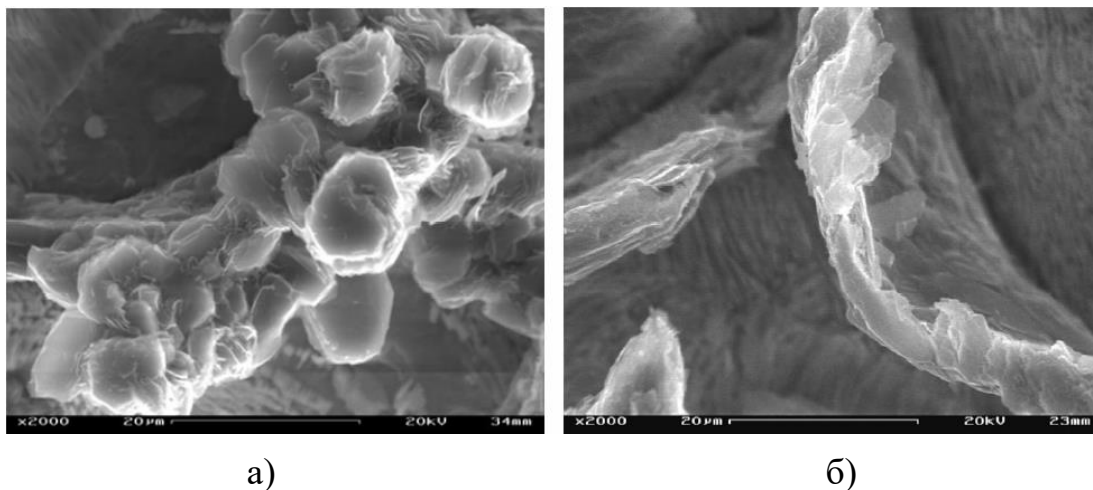


Рисунок 1.6 – Порівняння морфології країв включень:
а – вермикулярний графіт; б – пластинчастий графіт

Важливою особливістю вермикулярного графіту є відсутність чіткої ізольованості окремих включень. У багатьох випадках спостерігається їх частковий контакт або взаємне з'єднання в межах евтектичних колоній, що відрізняє вермикулярний графіт як від дискретних кулястих включень, так і від безперервних пластинчастих утворень. У міру віддалення від центру включень може спостерігатися локальне укрупнення графітових фрагментів, яке в окремих

випадках переходить у майже кулясту форму без порушення загальної цілісності структури.

Ідентифікація вермикулярного графіту, а також оцінка його кількості, розподілу та морфологічних характеристик у даній роботі здійснюється методами металографічного аналізу відповідно до вимог стандарту ДСТУ 3443-87, що доповнює положення міжнародних стандартів та забезпечує коректне зіставлення структурних станів чавунів з різною формою графіту.

Таким чином, вермикулярний графіт слід розглядати як самостійний структурний стан високоміцних чавунів, що поєднує знижений надрізуючий вплив графітових включень із характерною просторовою будовою. Це зумовлює специфічний комплекс властивостей чавунів з ВГ та визначає доцільність подальшого аналізу технологічних чинників, що впливають на формування і стабілізацію даної морфології графіту.

Висновки до розділу 1

1. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що морфологія графітових включень є визначальним структурним чинником, який формує механічні та експлуатаційні властивості високоміцних чавунів. Перехід від пластинчастої до компактних форм графіту супроводжується зниженням концентрації напружень у металевій матриці та підвищенням міцності і тріщиностійкості матеріалу.

2. Показано, що чавун з вермикулярною формою графіту займає проміжне положення між чавунами з пластинчастим і кулястим графітом за рівнем механічних властивостей, поєднуючи підвищену міцність із сприятливими теплофізичними характеристиками. Це обумовлює зростаючий інтерес до ЧВГ як перспективного конструкційного матеріалу для відповідальних виливків.

3. Встановлено, що формування вермикулярної морфології графіту у високоміцних чавунах характеризується надзвичайно вузьким технологічним інтервалом залишкового вмісту магнію та високою чутливістю до вмісту сірки, температури обробки та умов твердіння. Це зумовлює низьку відтворюваність структури при традиційному магнієвому модифікуванні.

4. Аналіз сучасних технологічних підходів до отримання ЧВГ показав, що використання лише магнієвого модифікування не забезпечує стабільного формування вермикулярної морфології графіту, особливо у виливках з підвищеною масивністю, де спостерігається деградація структури та зниження механічних властивостей.

5. Літературні дані свідчать, що застосування комплексного модифікування з використанням магнію та рідкоземельних елементів є найбільш перспективним шляхом стабілізації морфології графіту, оскільки дозволяє розширити допустимий інтервал залишкового вмісту магнію, зменшити вплив сірки та підвищити відтворюваність структури.

Разом з тим, у наявних дослідженнях недостатньо висвітлено питання взаємозв'язку між умовами твердіння, масивністю відливок та ефективністю

комплексного модифікування, а також вплив цих чинників на формування механічних властивостей високоміцного чавуну з вермикулярною формою графіту.

Виявлені в літературі проблемні аспекти та суперечності обумовлюють актуальність даної роботи і визначають необхідність проведення експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку впливу комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на морфологію графітових включень і механічні властивості високоміцного чавуну з урахуванням умов твердіння та масивності відливок.

Метою магістерської роботи є дослідження впливу комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на морфологію графіту та механічні властивості високоміцного чавуну.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішували наступні **завдання**:

- проаналізувати літературні дані щодо механізмів формування вермикулярної морфології графіту у високоміцних чавунах та ролі модифікувальних елементів;

- дослідити вплив умов модифікування, залишкового вмісту магнію і сірки, а також масивності відливок на морфологію графітових включень;

- провести порівняльний аналіз структури високоміцного чавуну після магнієвого та комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 з використанням методів металографічних досліджень;

- встановити взаємозв'язок між морфологією графітових включень та механічними властивостями високоміцного чавуну;

- оцінити вплив комплексного модифікування на механічні властивості та обґрунтувати доцільність застосування комплексних лігатур для забезпечення стабільності властивостей матеріалу.

Об'єктом дослідження є процеси формування структури та механічних властивостей високоміцного чавуну в умовах магнієвого та комплексного модифікування.

Предметом дослідження є вплив комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30Р3М30 на морфологію графітових включень, структурний стан металевої матриці та механічні властивості високоміцного чавуну залежно від умов твердіння і товщини стінки відливки.

Наукова новизна роботи.

Встановлено особливості впливу комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30Р3М30 на формування морфології графітових включень у високоміцному чавуні.

Показано, що застосування комплексних лігатур забезпечує більш стабільне формування вермикулярної форми графіту порівняно з традиційним магнієвим модифікуванням.

Встановлено взаємозв'язок між морфологією графітових включень та механічними властивостями високоміцного чавуну при комплексному модифікуванні.

Отримано експериментальні дані щодо впливу комплексного модифікування на міцність, твердість та характер руйнування високоміцного чавуну.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ТА МЕТОДИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ВЕРМИКУЛЯРНОЇ ФОРМИ ГРАФІТУ У ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНАХ

2.1 Застосування та загальні технологічні принципи одержання високоміцного чавуну

Високоміцний чавун з компактними формами графіту є одним із найбільш універсальних ливарних матеріалів сучасного машинобудування. З нього виготовляють виливки масою від часток кілограма до десятків тонн, що зумовлено широким діапазоном механічних і експлуатаційних властивостей цього матеріалу. Завдяки поєднанню високої міцності, достатньої пластичності та доброї ливарної технологічності високоміцний чавун успішно застосовується як альтернатива сірому чавуну, сталі та кольоровим сплавам.

У промисловій практиці високоміцний чавун використовується для виготовлення деталей, що працюють в умовах підвищених механічних і термічних навантажень, зокрема колінчастих і розподільних валів, корпусних та опорних елементів, зубчастих коліс, кронштейнів, маточин коліс, блоків циліндрів, гальмівних елементів та інших відповідальних виливків. Застосування високоміцного чавуну замість сталі дозволяє зменшити масу деталей, спростити технологію їх виготовлення та знизити собівартість продукції, а заміна кольорових сплавів сприяє скороченню витрат дефіцитних легуючих елементів.

Поряд із конструкційними марками, у промисловості широко використовують високоміцні чавуни зі спеціальними властивостями, зокрема жаростійкі, корозійностійкі та антифрикційні, що додатково розширює сферу їх застосування. Широке впровадження високоміцних чавунів зумовлене саме поєднанням високих фізико-механічних характеристик і сприятливих технологічних властивостей, що забезпечують економічну доцільність їх використання у серійному та масовому виробництві.

Основою технології одержання високоміцного чавуну є обробка рідкого чавунного розплаву модифікувальними матеріалами, які змінюють умови кристалізації вуглецю та сприяють формуванню компактних форм графіту. Найбільш поширеним є магнієвий процес, що передбачає введення в розплав металевого магнію, магнієвмісних лігатур або комплексних модифікаторів на їх основі. Основні промислові способи введення сфероїдизуючих добавок у розплав наведені на рис. 2.1.



Рисунок 2.1 – Основні способи введення сфероїдизуючих модифікаторів у розплав чавуну

Сучасні технології виготовлення високоміцного чавуну передбачають застосування різних способів введення модифікувальних матеріалів у розплав — у ковші, герметизованих ємностях, у потоці металу або безпосередньо в ливарній формі (рис. 2.1). Кожен із цих способів має свої переваги та обмеження, пов'язані зі ступенем засвоєння магнію, інтенсивністю реакцій, втратами температури та стабільністю отриманої структури.

У промисловій практиці також застосовується модифікування чавуну порошковим дротом, що вводиться у розплав з регульованою швидкістю, забезпечуючи дозований та відтворюваний характер обробки. Основні схеми такої обробки наведені на рис. 2.2.



Рисунок 2.2 – Схеми обробки чавуну модифікуючим порошковим дротом

Даний метод (рис. 2.2) дозволяє підвищити точність введення модифікувальних елементів, однак потребує спеціалізованого обладнання та стабільної якості дроту.

Важливою особливістю технології виготовлення високоміцного чавуну є необхідність жорсткого контролю хімічного складу розплаву, насамперед вмісту сірки, кисню, вуглецю та кремнію. Магній і деякі рідкоземельні елементи здатні стабілізувати цементит, тому вміст вуглецю і кремнію, як правило, підтримують на верхніх допустимих межах, а після сфероїдизуючої обробки розплав додатково модифікують феросиліцієм з метою запобігання відбілу.

Таким чином, технологія одержання високоміцного чавуну є складним багатофакторним процесом, у якому морфологія графітових включень визначається не лише складом модифікувальних матеріалів, але й способом їх введення, станом розплаву та умовами твердіння відливок. Це зумовлює необхідність подальшого аналізу механізмів формування різних форм графіту та ролі комплексного модифікування, що розглядається в наступних підрозділах даного розділу.

2.2 Аналіз модифікувальних матеріалів для одержання чавуну з вермикулярною формою графіту.

Для одержання чавуну з вермикулярною формою графіту застосовують, як правило, ті самі групи модифікаторів, що і при виробництві високоміцного чавуну з кулястим графітом, однак їх кількість та ефективність дії повинні бути істотно знижені. Це обумовлено тим, що формування вермикулярної морфології графіту можливе лише у вузькому інтервалі залишкового вмісту магнію, перевищення якого призводить до переходу графіту у кулясту форму.

Серед промислових модифікувальних матеріалів для обробки чавуну найбільш поширеними є залізо-кремній-магнієві лігатури, склад яких регламентується чинними нормативними документами. Типові хімічні склади таких лігатур наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад і основні характеристики залізо-кремній-магнієвих лігатур за ДСТУ 3362-96

Марка	Масова доля елементів, %					
	Mg	Кальцій	РЗМ	Кремній	Al	Решта-Fe
КМг7	6,5...8,5	0,2...1	0,3...1	40...55	до 2,5	
КМг6	5,5...6,5			40...55		
КМг5	4,5...6,5			40...55		
КМг4	3,5...4,5			40...55		
КМг3	2,5...3,5	2...4	2...4	40...55		
КМг2	1,5...2,5		1...2	55...70		
КМг1	0,5...1,5		55...70			

В таблиці 2.1 представлено широкий діапазон вмісту магнію, кальцію, рідкоземельних металів та кремнію. Саме варіювання концентрації активних елементів дозволяє адаптувати процес модифікування до конкретних умов плавки, масивності відливок і вимог до структури.

Лігатури, на відміну від чистого металевого магнію, характеризуються значно нижчою інтенсивністю піроефекту та підвищеним коефіцієнтом засвоєння магнію розплавом. Це істотно підвищує технологічну керованість

процесу та стабільність результатів. Технічні вимоги до комплексних магнієвмісних модифікаторів для чавунного лиття наведено у ДСТУ 3362-96, а типові склади комплексних модифікаторів – у таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Хімічний склад комплексних модифікаторів, що застосовуються для модифікування високоміцних чавунів (ТУ 14-5-134-2005)

Марка	Хім. склад, %					
	Mg	РЗМ	Ca	Si	Al не більш	Fe
ФСМг9	8,5...10,5	0,3-1,0	0,2...1,0	50-60	1,2	Решта
ФСМг7	6,5...8,5	0,3-1,0	0,2...1,0	45-55	1,2	
ФСМг5	4,5...6,5	0,3-1,0	0,2...1,0	45-55	1,2	
ФСМг3	2,5...3,5	1,0-2,0	2,0..4,0	55-70	2,5	

У таблиці 2.2 наведено хімічний склад комплексних модифікаторів, регламентований ТУ 14-5-134-2005, які застосовуються для модифікування високоміцних чавунів з метою керування морфологією графітових включень та стабілізації структури матеріалу. Представлені модифікатори є багатокомпонентними лігатурами на основі феросиліцію з додаванням магнію та рідкоземельних елементів.

Основним активним компонентом комплексних модифікаторів є магній, який забезпечує глобуляризуючу дію та визначає формування компактних форм графіту. Вміст магнію у складі лігатур підбирається таким чином, щоб створити умови для переважного формування вермикулярної морфології графіту без переходу до повної сфероїдизації вуглецю.

Рідкоземельні елементи (РЗМ), що входять до складу комплексних модифікаторів, виконують стабілізуючу функцію, зменшуючи чутливість процесу модифікування до коливань хімічного складу розплаву, насамперед до вмісту сірки та кисню. Утворення термодинамічно стійких сполук РЗМ з домішковими елементами сприяє зниженню витрат магнію на побічні реакції та розширенню технологічного інтервалу стабільного формування вермикулярного графіту.

Наявність кальцію та алюмінію у складі комплексних модифікаторів сприяє додатковому рафінуванню розплаву, зменшенню окислювальних процесів та покращенню умов кристалізації графіту. Кремній виконує роль носія активних елементів і водночас підсилює графітізуючу дію, що знижує схильність чавуну до відбілу, особливо у виливках з підвищеною масивністю.

Таким чином, хімічний склад комплексних модифікаторів, наведений у таблиці 2.2, забезпечує поєднання сфероїдизуючої дії магнію та стабілізуючого впливу рідкоземельних елементів, що створює передумови для більш відтворюваного формування вермикулярної морфології графіту та підвищення стабільності механічних властивостей високоміцного чавуну.

Вибір конкретного типу модифікатора здійснюється з урахуванням способу введення, маси та товщини стінки відливок, хімічного складу базового чавуну та необхідного комплексу механічних властивостей. На сьогодні значне поширення отримали залізо-кремній-магнієві лігатури на основі феросиліцію, які містять оптимально збалансовані кількості магнію, кальцію та рідкоземельних елементів. Як показують промислові дослідження, модифікатори з вмістом магнію близько 5...6 % і рідкоземельних металів 5,5...6,5 % забезпечують найбільш стабільне формування вермикулярної морфології графіту.

Встановлено, що присутність рідкоземельних металів у складі модифікатора позитивно впливає на чутливість мікроструктури до товщини відливки та сприяє розширенню допустимого інтервалу технологічних параметрів. При цьому стабільність засвоєння активних елементів досягається за рахунок підвищеного вмісту РЗМ у порівнянні з традиційними магнієвими лігатурами, що є особливо важливим для чавунів з вмістом сірки нижче 0,02 %.

Окрему групу становлять лігатури з додаванням титану, які застосовуються як десфероїдизуючі елементи при виробництві чавуну з вермикулярною формою графіту. Типовим прикладом є лігатура FeSiMgTi, хімічний склад якої регламентується відповідними технічними умовами. Дія титану частково нейтралізується присутніми у складі РЗМ, що дозволяє

стабілізувати процес формування вермикулярного графіту без переходу до повної сфероїдизації.

Застосування модифікаторів на основі рідкоземельних металів також розглядається як перспективний напрям отримання чавунів з ВГ, оскільки вони характеризуються підвищеною щільністю, вищою температурою кипіння та відсутністю вираженого піроефекту. Разом з тим, такі модифікатори мають схильність до відбілювання чавуну та підвищену вартість, що обмежує їх широке застосування. Типові склади феросиліцій-рідкоземельних лігатур наведено у табл. 2.3, а склади мішметалів – у табл. 3.7.

Таблиця 2.3 – Хімічний склад феросиліцій-рідкоземельних лігатур ФС30РЗМ30 та ФС10РЗМ10 відповідно до ТУ 14-5-136-81

Марка лігатури	Хімічні елементи, %				
	Si	РЗМ	Al	Mg	Fe
ФС30РЗМ30	35,0 - 45,0	30,0 -40,0	0,8 - 1,5	0,3 -1,2	решта
ФС10РЗМ10	8,0 - 10,0	8,0 - 10,0	0,8 - 1,5	0,3 -1,2	2,5

У таблиці 2.3 наведено хімічний склад феросиліцій-рідкоземельних лігатур марок ФС30РЗМ30 та ФС10РЗМ10, регламентований ТУ 14-5-136-81, які застосовуються як складові комплексних модифікувальних систем при обробці високоміцних чавунів. Дані лігатури відрізняються підвищеним вмістом рідкоземельних елементів і використовуються для стабілізації морфології графітових включень.

Лігатура ФС30РЗМ30 характеризується високим вмістом рідкоземельних елементів (30,0–40,0 %) та кремнію (35,0–45,0 %), що забезпечує інтенсивну стабілізуючу дію на розплав. Значна концентрація РЗМ сприяє зв'язуванню сірки та кисню з утворенням термодинамічно стійких сполук, зменшуючи витрати магнію на побічні реакції та підвищуючи відтворюваність формування вермикулярної морфології графіту.

Лігатура ФС10РЗМ10 має помірний вміст кремнію та рідкоземельних елементів (8,0–10,0 % кожного), що зумовлює більш м'яку стабілізуючу дію. Її застосування доцільне для корекції структури чавуну та зниження чутливості

процесу модифікування до коливань хімічного складу розплаву без істотного ризику надмірного впливу на морфологію графіту.

Присутність алюмінію у складі лігатур сприяє рафінуванню розплаву та зменшенню окислювальних процесів, тоді як магній, навіть у відносно невеликих кількостях, підсилює дію основного магнієвмісного модифікатора у складі комплексної системи. Кремній виконує функцію носія активних компонентів і водночас забезпечує додаткову графітізуючу дію, знижуючи схильність чавуну до відбілу.

Таким чином, хімічний склад лігатур ФС30РЗМ30 та ФС10РЗМ10, наведений у таблиці 2.3, забезпечує їх ефективне використання у складі комплексних модифікувальних систем для стабілізації вермикулярної морфології графіту та підвищення відтворюваності механічних властивостей високоміцного чавуну.

Для оцінки можливостей використання рідкоземельних елементів у складі комплексних модифікувальних систем доцільно розглянути хімічний склад мішметалів, які широко застосовуються у ливарній практиці як джерело РЗМ. Мішметали характеризуються багатокомпонентним складом і містять переважно легкі рідкоземельні елементи, що визначає їх стабілізуючу дію на процеси формування графітових включень у чавуні. У таблиці 2.4 наведено хімічний склад мішметалів марок МЦ50Ж3 та МЦ50Ж6, регламентований ТУ 48-4-280-91, які можуть застосовуватись для зниження чутливості модифікування до домішкових елементів і підвищення відтворюваності структури високоміцного чавуну.

Таблиця 2.4 – Хімічний склад мішметалу МЦ50Ж3, МЦ50Ж6 згідно ТУ 48-4-280-91

Марка	Хімічні елементи, %				
	Ce	La	Nd	Pr	Fe
МЦ50Ж3	40,0...60,0	25,0...45,0	до 3,0	до 10,0	до 3,0
МЦ50Ж6	40,0...60,0	20,0...40,0	до 3,0	до 10,0	до 6,0

У таблиці 2.4 наведено хімічний склад мішметалів марок МЦ50Ж3 та МЦ50Ж6, регламентований ТУ 48-4-280-91, які використовуються як джерело рідкоземельних елементів при модифікуванні чавунних розплавів. Мішметали являють собою багатокомпонентні сплави на основі легких рідкоземельних елементів, насамперед церію та лантану, і застосовуються для стабілізації процесів формування графітових включень.

Основними компонентами мішметалів є церій (Ce) та лантан (La), сумарний вміст яких визначає інтенсивність стабілізуючої дії на розплав. Ці елементи характеризуються високою хімічною спорідненістю до сірки та кисню і сприяють утворенню термодинамічно стійких сульфідів і оксидів, що зменшує негативний вплив домішкових елементів на процес модифікування та підвищує ефективність дії магнію.

Наявність у складі мішметалів неодиму (Nd) та празеодиму (Pr) додатково впливає на кінетику кристалізації та сприяє рафінуванню розплаву, хоча їх дія є менш вираженою порівняно з церієм і лантаном. Залізо у складі мішметалів виконує роль металевої основи та забезпечує технологічну сумісність цих матеріалів з чавунним розплавом.

Порівняння складів мішметалів МЦ50Ж3 та МЦ50Ж6 свідчить, що підвищений вміст заліза у марці МЦ50Ж6 може зменшувати інтенсивність модифікувальної дії рідкоземельних елементів, але водночас підвищує технологічну стабільність введення мішметалу в розплав. Це обумовлює доцільність вибору конкретної марки залежно від умов плавки, вмісту домішкових елементів та вимог до стабільності формування морфології графіту.

Слід зазначити, що продукти взаємодії рідкоземельних металів з сіркою та киснем характеризуються підвищеною щільністю та меншою схильністю до видалення з розплаву, що може призводити до забруднення виливків неметалевими включеннями порівняно з магнієвими продуктами реакцій.

Завершальним етапом технології ковшового модифікування чавуну з вермикулярною формою графіту є вторинне графітизуюче модифікування, спрямоване на запобігання відбілу та стимулювання виділення графіту.

Найчастіше для цієї мети застосовують феросиліцій марки ФС75, при цьому вміст домішкових елементів у ньому істотно впливає на стабільність структури та властивостей відливок.

Графітізуюча дія феросиліцію може бути підсилена введенням таких елементів, як барій, цирконій, стронцій, рідкоземельні метали та алюміній. Водночас слід враховувати, що деякі з цих елементів здатні посилювати глобуляризуючу дію магнію, що за певних умов може призводити до формування кулястого графіту. Також встановлено, що проведення графітізуючого модифікування при температурах нижче 1400 °С сприяє підвищенню ймовірності утворення кулястої форми графіту.

2.3 Вплив залишкового вмісту магнію на морфологію графіту.

Магній є основним модифікуючим елементом, що визначає формування компактних форм графіту у високоміцних чавунах. Його введення в розплав спричиняє суттєву зміну умов кристалізації вуглецю та сприяє переходу від пластинчастої морфології графіту до вермикулярної або кулястої форми. Разом з тим, ефективність магнієвого модифікування характеризується високою чутливістю до залишкового вмісту магнію в розплаві, що зумовлює складність керування структурою чавунів у промислових умовах.

Встановлено, що формування вермикулярної форми графіту реалізується лише у вузькому інтервалі залишкового вмісту магнію. За недостатньої кількості магнію в структурі чавуну зберігаються включення пластинчастого графіту, тоді як його надлишок призводить до інтенсивної сфероїдизації вуглецю та формування кулястого графіту. Таким чином, вермикулярний графіт займає проміжне положення між цими двома структурними станами та є найбільш чутливим до коливань $Mg_{зал}$.

Практичні дані промислових і лабораторних досліджень свідчать, що стабільне формування вермикулярного графіту забезпечується, як правило, за залишкового вмісту магнію на рівні 0,010...0,020 %. Вихід за межі цього

діапазону супроводжується різкою зміною морфології графітових включень, що негативно впливає на відтворюваність структури та властивостей чавуну. Даний факт підтверджується узагальненими технологічними діаграмами, які демонструють вузьку область стабільного існування вермикулярної форми графіту (рис. 2.3).

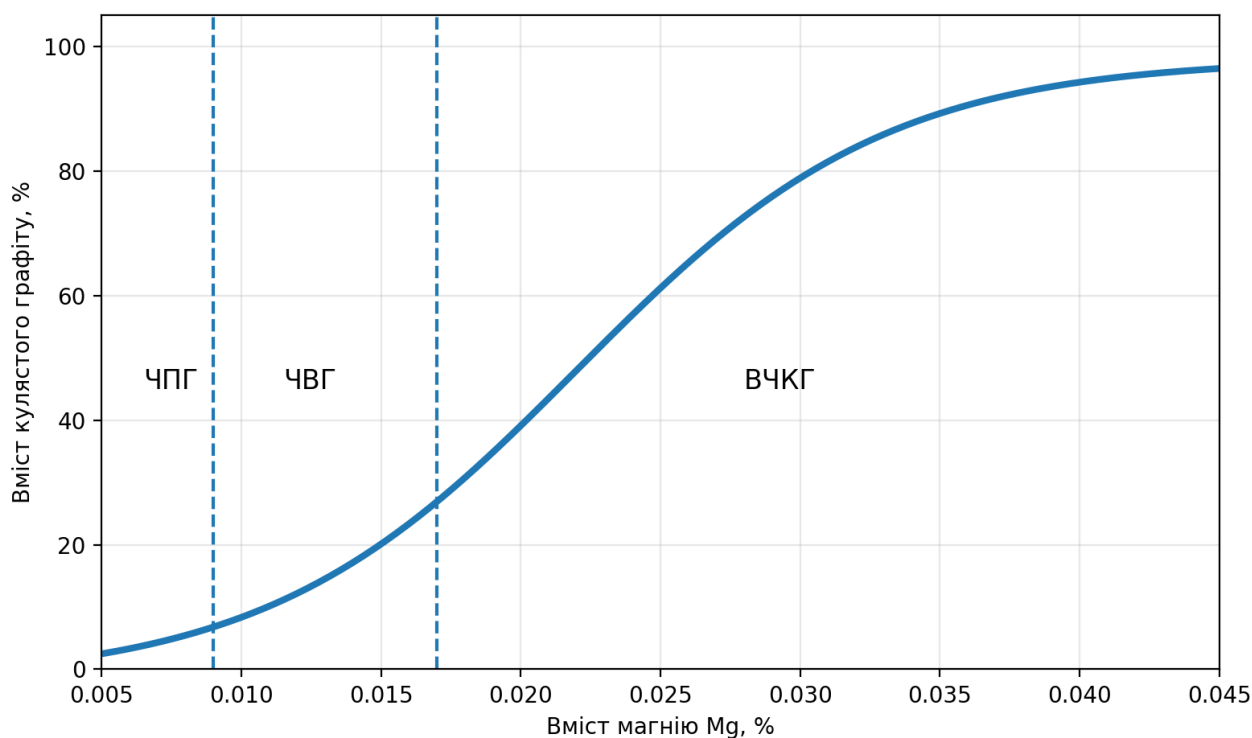


Рисунок 2.3 – Область стабільного утворення вермикулярного графіту в магнієвмісному чавуні.

Як видно з рисунка 2.3, збільшення залишкового вмісту магнію в розплаві супроводжується різким зростанням частки кулястого графіту, причому перехід від вермикулярної до кулястої форми відбувається у вузькому інтервалі концентрацій Mg. Це зумовлює нестабільність структури при традиційному магнієвому модифікуванні та обґрунтовує доцільність застосування комплексних лігатур для стабілізації морфології графіту.

Особливою вимогою до чавунів з вермикулярною формою графіту є мінімальний вміст включень кулястого графіту в структурі. Наявність навіть незначної кількості кулястих включень свідчить про надлишкову дію магнію та порушення умов формування вермикулярної морфології. У зв'язку з цим

контроль $Mg_{\text{зал}}$ має здійснюватися з високою точністю, що значно ускладнює технологічний процес.

Стабільність залишкового вмісту магнію в розплаві істотно залежить від ряду чинників, зокрема температури модифікування, часу витримки після введення магнієвмісної лігатури, інтенсивності окислювальних процесів та взаємодії магнію з домішковими елементами. Відомо, що магній характеризується високою хімічною активністю та схильністю до вигорання, що призводить до його швидкого зниження вмісту в розплаві та підвищує нестабільність отримуваної структури.

Додатковим фактором, що впливає на ефективність магнієвого модифікування, є наявність у розплаві сірки, яка активно взаємодіє з магнієм з утворенням тугоплавких сполук. Витрата магнію на нейтралізацію сірки зменшує його ефективну кількість, доступну для модифікування графіту, що ще більше звужує інтервал стабільного формування вермикулярної морфології.

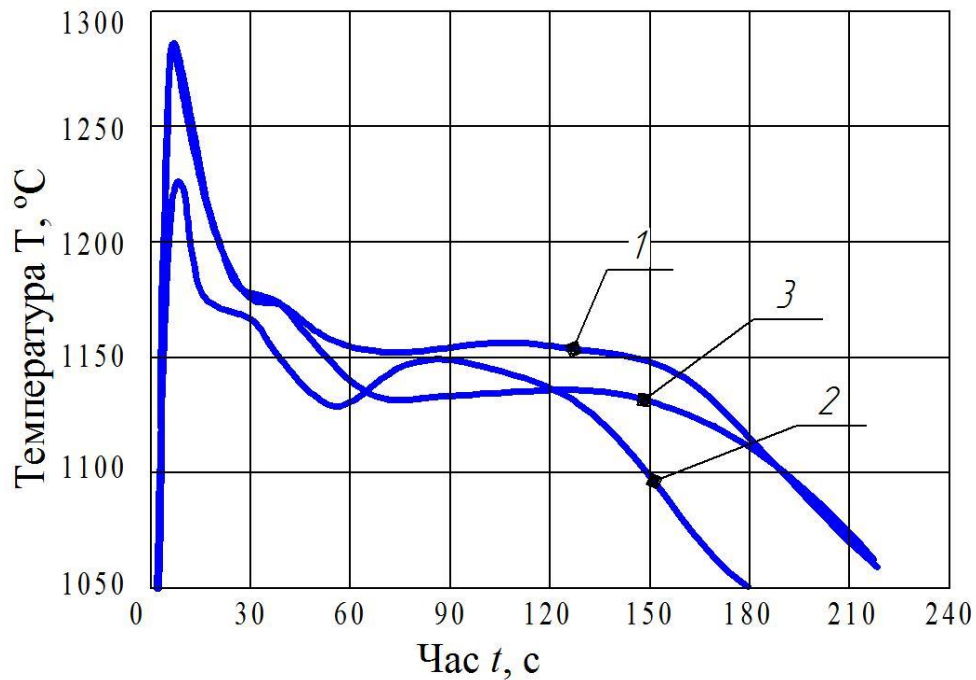
Таким чином, магнієве модифікування, незважаючи на його ключову роль у формуванні компактних форм графіту, не забезпечує достатньої стабільності структури чавуну з вермикулярною формою графіту при традиційних технологічних підходах. Вузкий інтервал допустимого залишкового вмісту магнію та його висока чутливість до технологічних факторів зумовлюють необхідність пошуку більш ефективних рішень, спрямованих на стабілізацію процесу модифікування, що є предметом подальшого розгляду.

2.4 Механізм формування вермикулярного графіту в магнієвих чавунах.

Незважаючи на значний обсяг експериментальних і теоретичних досліджень, механізм формування вермикулярної форми графіту в магнієвих чавунах на сьогодні не має єдиного загальноприйнятого трактування. Більшість існуючих підходів розглядають окремі аспекти процесу кристалізації, однак не враховують комплексної дії термодинамічних, дифузійних та кінетичних

чинників, що зумовлює відсутність універсальних практичних рекомендацій щодо стабільного отримання вермикулярного графіту.

Встановлено, що формування вермикулярного графіту, подібно до кулястого, відбувається за умов переохолодження розплаву відносно температури рівноважної евтектичної кристалізації (рис. 2.4).



1 – ЧПГ; 2 – ЧВГ; 3 – ВЧКГ

Рисунок 2.4 – Характеристики кристалізації та охолодження чавуну з різною формою графіту.

Аналіз кривих охолодження чавунів з різною формою графітових включень (рис. 2.4) свідчить, що температура початку евтектичного перетворення у чавунах з вермикулярним і кулястим графітом є нижчою, ніж у чавунах з пластинчастою формою графіту. Це вказує на принципово інший механізм росту графітної фази в умовах дії магнію.

Однією з найбільш обґрунтованих гіпотез є утворення навколо включень вермикулярного графіту аустенітної оболонки, яка суттєво змінює умови масопереносу вуглецю. На відміну від пластинчастого графіту, ріст якого здійснюється переважно за рахунок безпосередньої дифузії вуглецю з рідкої фази, формування вермикулярного графіту відбувається в умовах дифузійного

підведення вуглецю через аустенітну оболонку. Низька дифузійна рухливість вуглецю в аустеніті зумовлює зменшення швидкості росту евтектики та сприяє формуванню укорочених і потовщених графітових включень.

Порівняльний аналіз процесів кристалізації показує, що швидкість росту аустеніту у чавунах з вермикулярним і кулястим графітом є вищою, ніж у чавунах з пластинчастим графітом. Водночас, наявність локального зв'язку окремих ділянок графіту з рідким розплавом, а також неоднорідність хімічного складу аустенітної оболонки призводять до відмінностей між механізмами росту вермикулярного та кулястого графіту. У випадку вермикулярної морфології надходження атомів вуглецю до зростаючих включень здійснюється через систему рідких каналів, оточених аустенітом, що зумовлює їх розгалужену, червоподібну форму (рис. 2.5).

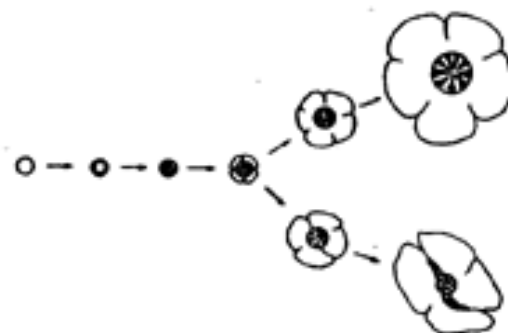


Рисунок 2.5 – Ріст включень кулястого і ВГ в оточеній аустенітній оболонці

У процесі дифузійного росту графітових включень в аустенітній оболонці виникають значні локальні деформації, пов'язані з об'ємними ефектами фазових перетворень. Це призводить до формування ділянок з підвищеною вільною енергією, які характеризуються зниженою температурою плавлення та низькою дифузійною проникністю. У таких умовах можливе локальне крихке розтріскування аустенітної оболонки, що сприяє нерівномірному росту графіту та стабілізації вермикулярної морфології.

Аналіз літературних джерел показує, що на сьогодні існує декілька принципово різних технологічних підходів до отримання чавуну з

вермикулярною формою графіту, які відрізняються як механізмом формування морфології графіту, так і стабільністю досягнутих результатів. Основні технологічні підходи до отримання чавуну з вермикулярною формою графіту наведені в табл. 2.5)

Таблиця 2.5 – Порівняльна характеристика підходів до формування вермикулярної форми графіту

№	Технологічний підхід	Сутність методу	Основні переваги	Основні недоліки	Стабільність формування ВГ
1	Недомодифікований	Введення магнію в кількості, недостатній для повної сфероїдизації графіту	Простота реалізації, мінімальні витрати	Вузький інтервал $Mg_{зал}$, висока чутливість до S і температури	Низька
2	Магнієве модифікування з десфероїдизатором	Спочатку сфероїдизація графіту магнієм, після чого введення елементів, що порушують кулясту форму	Можливість часткового керування формою графіту	Ускладнення технології, нестабільність результатів	Середня
3	Корекція за пробою	Регулювання залишкового вмісту Mg за результатами експрес-проб	Підвищена точність контролю $Mg_{зал}$	Високі вимоги до оперативності та контролю	Середня
4	Комплексне модифікування Mg + РЗМ	Поєднання магнієвого модифікування зі стабілізуючою дією рідкоземельних елементів	Розширення технологічного вікна, висока відтворюваність структури	Підвищені вимоги до підбору лігатур	Висока (найбільш стабільний метод)

Недомодифікування магнієм є найпростішим з технологічної точки зору підходом, однак він характеризується надзвичайно вузьким інтервалом залишкового вмісту магнію, що обумовлює низьку відтворюваність структури та високу чутливість до вмісту сірки і температурних факторів. Застосування десфероїдизаторів дозволяє частково коригувати морфологію графіту, проте

ускладнює технологічний процес і не забезпечує стабільного формування вермикулярної структури.

Підхід, що базується на корекції залишкового вмісту магнію за результатами експрес-проб, підвищує керованість процесу, але потребує складної системи контролю і не усуває впливу домішкових елементів та часових факторів. Найбільш перспективним і стабільним з точки зору промислового застосування є комплексне модифікування з використанням магнію та рідкоземельних елементів, яке дозволяє зменшити витрати магнію на побічні реакції, розширити допустимий інтервал Mgзал і забезпечити переважне формування вермикулярної морфології графіту.

Саме цей підхід покладено в основу експериментальних досліджень, виконаних у даній роботі.

Таким чином, механізм формування вермикулярного графіту в магнієвих чавунах визначається поєднанням переохолодження розплаву, дифузійних обмежень росту графіту в аустенітній оболонці та високої чутливості процесу до залишкового вмісту магнію. Саме ці чинники обумовлюють вузький інтервал стабільного існування вермикулярної форми графіту та пояснюють низьку відтворюваність структури при традиційному магнієвому модифікуванні, що зумовлює необхідність застосування більш ефективних технологічних підходів до стабілізації процесу формування графітових включень.

2.5 Роль домішкових елементів у формуванні вермикулярної форми графіту.

Ефективність магнієвого модифікування та стабільність формування вермикулярної форми графіту у високоміцних чавунах значною мірою визначаються наявністю та вмістом домішкових елементів у розплаві. Навіть за оптимального залишкового вмісту магнію домішки можуть істотно впливати на механізм кристалізації графіту, змінюючи морфологію включень і знижуючи відтворюваність структури чавуну.

Найбільш суттєвий вплив на процес формування вермикулярного графіту чинить сірка, яка характеризується високою хімічною спорідненістю до магнію. Взаємодія магнію з сіркою супроводжується утворенням термодинамічно стійких сульфідів, що призводить до витрати магнію на побічні реакції та зменшення його ефективної кількості, доступної для модифікування графіту. У результаті навіть незначне підвищення вмісту сірки може спричинити деградацію вермикулярної морфології та появу включень пластинчастого графіту.

Особливістю впливу сірки є також її непрямий вплив на кінетику кристалізації. Зменшення активного вмісту магнію в розплав порушує умови формування аустенітної оболонки навколо графітових включень, що, у свою чергу, призводить до зміни механізму росту графіту та зниження стабільності вермикулярної форми. Схематично вплив взаємодії магнію з сіркою на ефективність модифікування відображено на рис. 2.6.

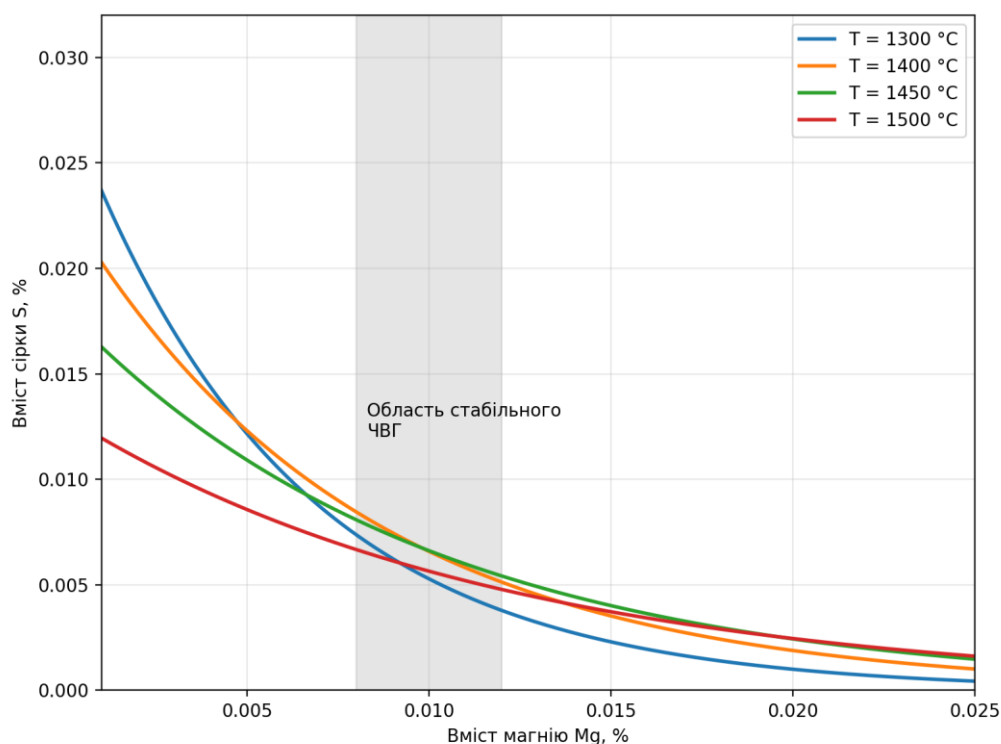


Рисунок 2.6 – Ізотермічні умови рівноваги реакції $[Mg] + [S] = MgS$ у чавунному розплаві при різних температурах ($p = 1$ бар).

Окрім сірки, на формування вермикулярного графіту впливають також кисень, фосфор, азот та деякі інші домішкові елементи. Кисень, подібно до сірки, сприяє інтенсивному вигоранню магнію та зменшенню його залишкового вмісту в розплаві. Фосфор і азот, залежно від концентрації та умов кристалізації, можуть впливати на евтектичні перетворення та морфологію графітових включень, однак їх дія, як правило, має другорядний характер порівняно з впливом сірки.

Суттєвим є також вплив домішкових елементів на часову стабільність магнієвого модифікування. У процесі витримки розплаву після введення магнієвмісних лігатур відбувається поступове зниження ефективного вмісту магнію внаслідок окислювальних процесів і взаємодії з домішками. Це призводить до звуження технологічного вікна формування вермикулярного графіту та підвищує ризик переходу структури в небажані морфологічні стани.

Таким чином, домішкові елементи є одним із ключових чинників, що обмежують стабільність формування вермикулярної форми графіту при традиційному магнієвому модифікуванні. Їх вплив проявляється як через пряме зменшення ефективного вмісту магнію, так і через опосередкований вплив на механізм кристалізації графіту. Це обумовлює доцільність застосування технологічних рішень, спрямованих на компенсацію дії домішок і стабілізацію процесу модифікування, зокрема шляхом використання комплексних лігатур, що і є предметом подальшого дослідження.

2.6 Методика дослідження мікроструктури чавунів.

Дослідження мікроструктури чавунів з різною формою графітових включень проводили з метою ідентифікації морфології графіту, оцінки його кількості, розмірів і просторового розподілу, а також встановлення характеру металевої матриці. Металографічний аналіз є базовим методом структурних досліджень чавунів і дозволяє отримати об'єктивну інформацію про вплив технологічних параметрів модифікування на формування графітної фази.

Для проведення металографічних досліджень із відливок вирізали зразки у вигляді шліфів, орієнтованих перпендикулярно до напрямку тепловідведення. Підготовку зразків здійснювали за стандартною методикою, що включала послідовне шліфування на абразивних матеріалах зі зменшенням зернистості та подальше полірування до дзеркального стану поверхні. Частина зразків досліджувалась у нетравленому стані з метою аналізу форми та розподілу графітових включень, інша частина — після травлення для виявлення структури металевої матриці.

Металографічні дослідження проводили з використанням оптичних металографічних мікроскопів відбитого світла типу МІМ-7, ПМТ-3 та аналогічних приладів, оснащених системами візуалізації та цифрової фіксації зображень. Застосування даних мікроскопів дозволяло здійснювати спостереження мікроструктури чавунів у широкому діапазоні збільшень та забезпечувало достатню роздільну здатність для коректної ідентифікації морфології графітових включень.

Спостереження мікроструктури для аналізу форми графіту проводили переважно у нетравленому стані зразків, що дозволяло чітко виділити контури графітових включень і визначити їх морфологічні характеристики. Для виявлення структури металевої матриці застосовували травлення стандартними реактивами з подальшим дослідженням при відповідних збільшеннях.

Фіксацію мікроструктур здійснювали з використанням цифрових камер, інтегрованих у оптичну систему мікроскопів, з подальшою обробкою зображень та вимірюванням геометричних параметрів графітових включень.

Оцінку морфології графітових включень проводили відповідно до вимог міжнародних стандартів ISO 945-1:2008 та ISO 16112:2006, що регламентують класифікацію форм графіту та методи їх кількісної оцінки. Ідентифікацію вермикулярної форми графіту здійснювали за візуальними ознаками та з використанням кількісних показників, зокрема фактора форми округлості RSF і ступеня сфероїдизації графіту (ССГ). При цьому враховували лише включення

графіту з характерним розміром понад 10 мкм, що відповідає вимогам стандарту ISO 16112.

Металографічні спостереження виконували при збільшеннях, достатніх для коректної ідентифікації морфології графітових включень, як правило, $\times 100$, що дозволяло одночасно оцінити форму, розміри та характер їх розподілу в об'ємі металевої матриці. Для підвищення достовірності результатів аналіз проводили на кількох ділянках кожного зразка з сумарною площею дослідження не менше 4 мм².

Кількісну оцінку параметрів структури здійснювали шляхом порівняння отриманих мікроструктур з еталонними шкалами стандартів, а також методом підрахунку відносної частки різних форм графіту. У разі необхідності використовували елементи автоматизованого аналізу зображень, що дозволяло зменшити суб'єктивність оцінювання та підвищити відтворюваність результатів.

Таким чином, застосована методика металографічних досліджень забезпечує надійну і відтворювану оцінку морфології графітових включень і дозволяє коректно встановити взаємозв'язок між технологічними параметрами модифікування та структурним станом чавунів, що є необхідною передумовою для подальшого аналізу впливу комплексного модифікування на структуру і властивості матеріалу.

Висновки до розділу 2

1. Показано, що формування вермикулярної форми графіту є технологічно складним процесом, який характеризується вузьким інтервалом залишкового вмісту магнію та високою чутливістю до хімічного складу базового чавуну, вмісту сірки, температурних умов та способу модифікування розплаву.

2. Проведений аналіз способів введення сфероїдизуючих і комплексних модифікаторів у розплав чавуну дозволив визначити їх технологічні можливості, переваги та обмеження, а також обґрунтувати доцільність використання керованих методів ковшового та внутрішньоформового модифікування при виробництві чавунів з вермикулярною формою графіту.

3. Узагальнення даних щодо складу та дії залізо-кремній-магнієвих і комплексних модифікаторів, що містять кальцій та рідкоземельні елементи, показало їх вирішальну роль у стабілізації процесів модифікування та розширенні допустимого технологічного інтервалу формування вермикулярної морфології графіту.

4. Розглянуті методи металографічного аналізу, кількісної оцінки морфології графіту та визначення механічних властивостей забезпечують достатню інформативність і відтворюваність результатів, що є необхідною умовою для коректної оцінки ефективності різних способів модифікування.

5. Отримані в розділі теоретичні та методичні положення слугували основою для формування програми експериментальних досліджень, спрямованих на оцінку впливу комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на морфологію графіту та механічні властивості високоміцного чавуну, результати яких наведені у розділі 3.

РОЗДІЛ 3

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНОГО МОДИФІКУВАННЯ НА МОРФОЛОГІЮ ГРАФІТУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

3.1 Характеристика комплексних модифікуючих лігатур та умови проведення модифікування

З огляду на встановлену у розділі 2 високу чутливість формування вермикулярної форми графіту до залишкового вмісту магнію та значний вплив домішкових елементів, традиційне магнієве модифікування не забезпечує достатньої стабільності структури чавуну з ВГ. У зв'язку з цим перспективним напрямом підвищення відтворюваності морфології графіту є застосування комплексних модифікуючих лігатур, дія яких базується на поєднанні ефектів магнію та рідкоземельних елементів.

У даній роботі для модифікування високоміцного чавуну з вермикулярною формою графіту застосовували комплекс лігатур ФСМг та ФС30РЗМ30, які вводились у розплав послідовно або у визначеній комбінації. Лігатури типу ФСМг виконують функцію основного носія магнію, забезпечуючи глобуляризуючу дію на графітову фазу, тоді як лігатура ФС30РЗМ30 використовується як стабілізатор процесу модифікування за рахунок присутності рідкоземельних елементів.

Магнієвмісні феросиліцієві лігатури типу ФСМг характеризуються відносно високою швидкістю розчинення у розплаві та інтенсивною модифікувальною дією, однак їх ефективність істотно знижується внаслідок вигорання магнію та його взаємодії з домішковими елементами, насамперед із сіркою. Це обумовлює нестабільність залишкового вмісту магнію та звуження технологічного вікна формування вермикулярної морфології графіту.

Лігатура ФС30РЗМ30 містить комплекс рідкоземельних елементів, які характеризуються високою хімічною активністю щодо сірки та кисню. Введення

даної лігатури у розплав сприяє зв'язуванню шкідливих домішок у термодинамічно стійкі сполуки, що зменшує витрату магнію на побічні реакції та підвищує ефективність його модифікувальної дії. Окрім цього, рідкоземельні елементи здатні впливати на процеси зародження та росту графітових включень, стабілізуючи формування вермикулярної морфології.

Комплексне застосування лігатур ФСМг–ФС30РЗМ30 дозволяє реалізувати синергічний ефект, за якого магній забезпечує формування компактних форм графіту, а рідкоземельні елементи — стабілізацію цього процесу в часі та розширення допустимого інтервалу залишкового вмісту магнію. Такий підхід є особливо ефективним для отримання чавуну з вермикулярною формою графіту з мінімальною часткою кулястих включень.

Модифікування розплаву здійснювали при температурі, що забезпечує повне розчинення лігатур та мінімізацію втрат магнію. Введення лігатур проводили безпосередньо перед заливанням з урахуванням часу витримки, необхідного для стабілізації хімічного складу розплаву. Обрані умови модифікування дозволяли забезпечити відтворюваність результатів і створювали передумови для об'єктивної оцінки впливу комплексних лігатур на морфологію графіту та властивості чавуну.

Таким чином, застосування комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 є обґрунтованим технологічним рішенням, спрямованим на стабілізацію формування вермикулярної форми графіту та зниження чутливості структури чавуну до коливань технологічних параметрів, що і стало предметом подальших експериментальних досліджень.

Умови проведення модифікування та характеристика застосованих лігатур узагальнені в табл. 3.1

Таблиця 3.1 – Характеристика комплексного модифікування та умов проведення експерименту

№	Тип модифікування	Застосована лігатура	Функціональне призначення лігатури	Орієнтовний вміст активних елементів	Час витримки після модифікування	Очікуваний структурний ефект
1	Без модифікування	–	Контрольний стан	–	–	Пластинчастий або деградований графіт
2	Магнієве	ФСМг	Формування компактних форм графіту	Mg	Короткий	Перехідна морфологія, нестабільний ВГ
3	Комплексне	ФСМг + ФС30РЗМ30	Поєднання глобуляризуючої та стабілізуючої дії	Mg + РЗМ	Середній	Переважно вермикулярний графіт
4	Комплексне (оптимізоване)	ФСМг + ФС30РЗМ30	Стабілізація Mg та нейтралізація домішок	Mg + РЗМ	Контрольований	Стабільна ВГ з мінімумом КГ

Наведені в табл. 3.1 серії експериментів дозволяють системно оцінити вплив різних підходів до модифікування на формування морфології графітових включень у високоміцному чавуні. Контрольна серія без модифікування використовується для встановлення вихідного структурного стану та порівняльної оцінки ефективності подальших технологічних впливів. Серія з використанням лише магнієвмісної лігатури ФСМг дозволяє проаналізувати характер і стабільність формування компактних форм графіту за традиційного підходу до модифікування.

Комплексне модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 спрямоване на реалізацію синергічного ефекту, за якого поєднання глобуляризуючої дії магнію та стабілізуючого впливу рідкоземельних елементів забезпечує формування переважно вермикулярної морфології графіту з мінімальною часткою кулястих включень. Така постановка експерименту створює передумови для об’єктивного аналізу впливу комплексного модифікування на структурний стан чавуну, що розглядається в наступному підпункті.

Зміна механічних властивостей чавуну при зміні масивності відливки безпосередньо пов'язана з еволюцією морфології графітових включень (рис. 3.1).

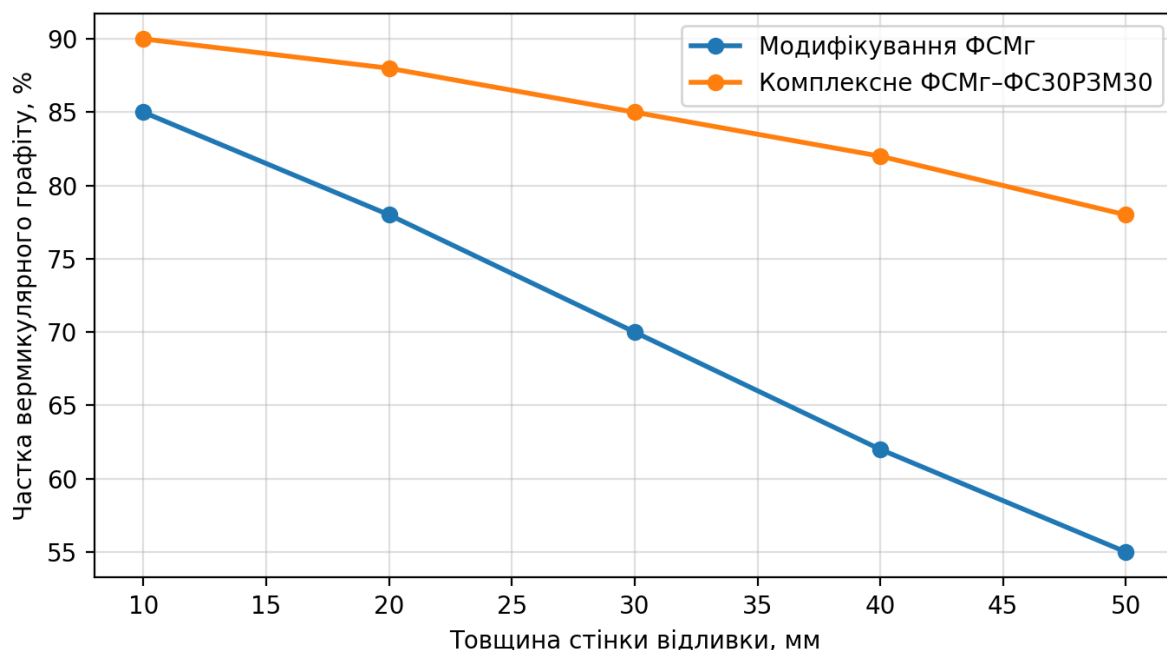


Рисунок 3.1 – Зміна частки вермикулярного графіту залежно від товщини стінки відливки при різних видах модифікування

Як видно з рис. 3.1, зі збільшенням товщини стінки відливки спостерігається зменшення частки вермикулярного графіту, що свідчить про деградацію морфології графітових включень при зниженні швидкості охолодження. При цьому комплексне модифікування лігатурами ФСМг-ФС30РЗМ30 дозволяє зберегти більш високу частку вермикулярної форми графіту в усьому діапазоні досліджених товщин порівняно з традиційним магнієвим модифікуванням.

Для оцінки впливу умов твердіння на механічні властивості високоміцного чавуну було проаналізовано залежність межі міцності при розтягуванні від товщини стінки відливки при різних способах модифікування (рис. 3.2).

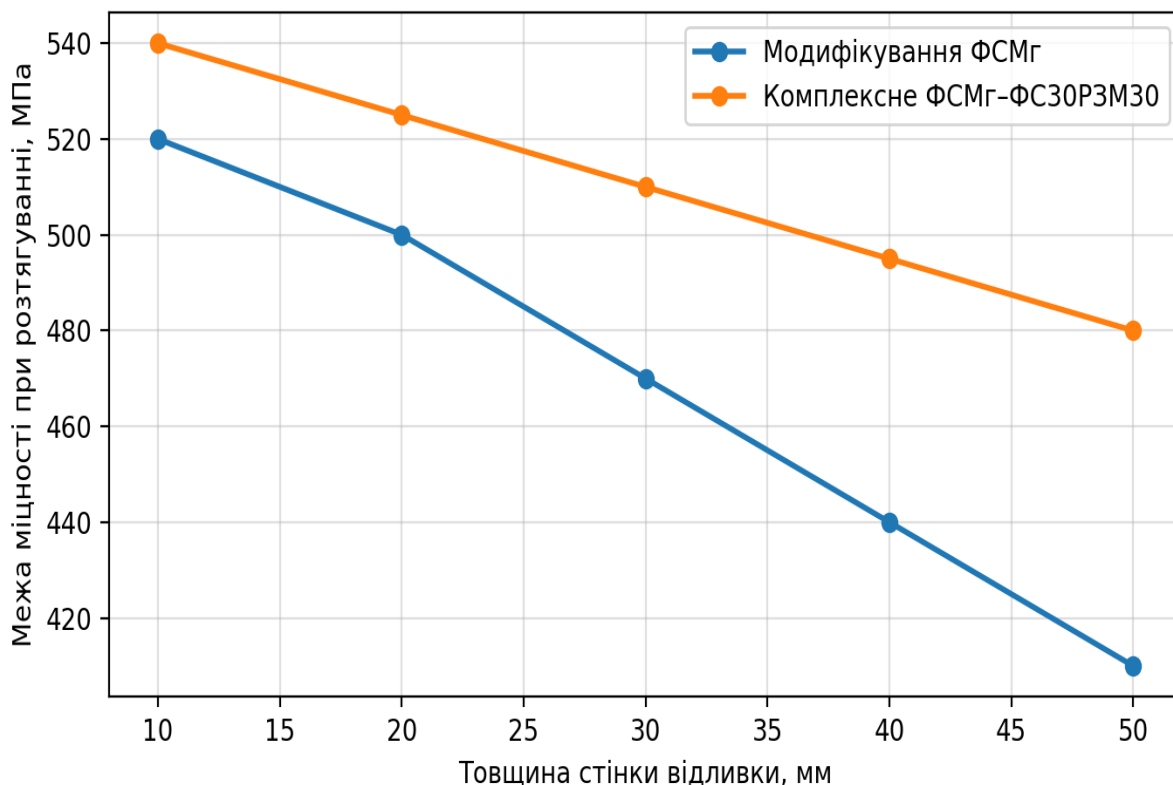


Рисунок 3.2 – Залежність межі міцності при розтягуванні від товщини стінки відливки при різних способах модифікування

Як видно з рис. 3.2, зі збільшенням товщини стінки відливки спостерігається зниження межі міцності, що пов'язано зі зменшенням швидкості охолодження та укрупненням графітових включень. При цьому комплексне модифікування лігатурами ФСМг–ФС30Р3М30 забезпечує більш стабільний рівень міцності в усьому дослідженому діапазоні товщин порівняно з магнієвим модифікуванням.

Отримані результати свідчать, що стабільність механічних властивостей тісно пов'язана зі стабільністю морфології графіту, що обумовлює доцільність застосування комплексного модифікування, розглянутого у наступному підпункті.

3.2 Вплив комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на морфологію графіту

Порівняльний аналіз мікроструктури високоміцного чавуну показав, що застосування комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 істотно впливає на характер формування графітових включень і забезпечує значно вищу стабільність вермикулярної морфології графіту порівняно з традиційним магнієвим модифікуванням. Отримані результати свідчать, що поєднання глобуляризуючої дії магнію та стабілізуючого впливу рідкоземельних елементів дозволяє ефективно керувати структурним станом чавуну.

У випадку використання лише магнієвмісної лігатури ФСМг у мікроструктурі спостерігається неоднорідний характер формування графітових включень. Поряд із вермикулярними формами присутня помітна частка кулястого графіту, що вказує на локальні коливання ефективної дії магнію та нестабільність процесу модифікування (рис. 3.3).

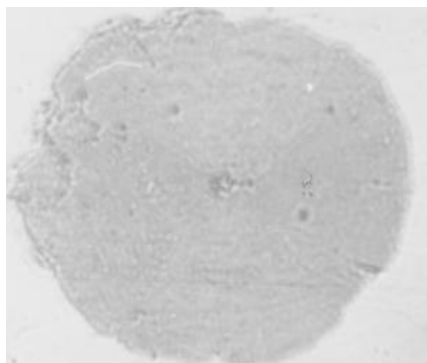
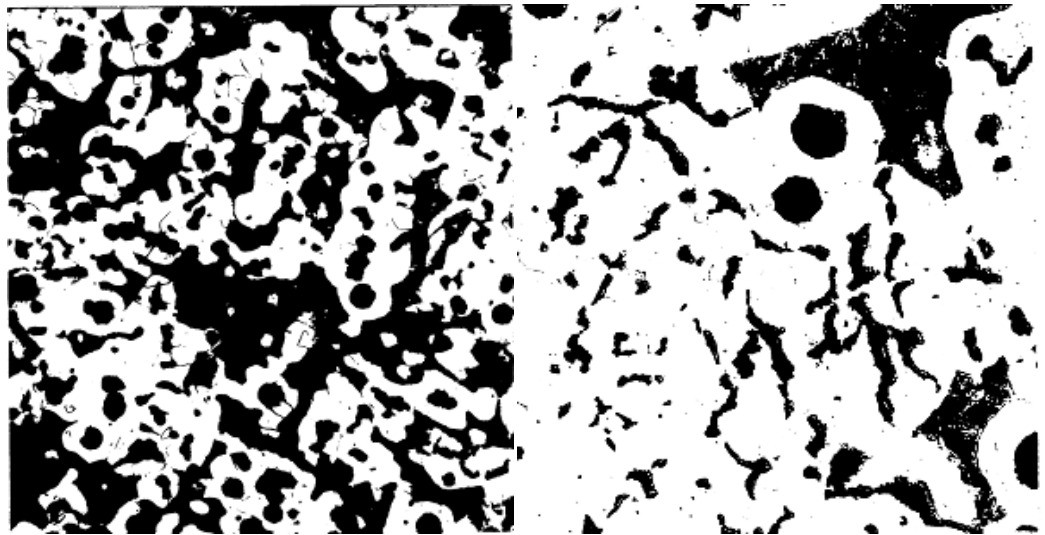


Рисунок 3.3 – Магнійвмісне включення кулястого графіту в центральній частині

Така структура (рис. 3.3) є характерною для традиційного магнієвого модифікування і підтверджує високу чутливість морфології графіту до змін залишкового вмісту магнію та умов обробки розплав.

Застосування комплексного модифікування з використанням лігатур ФСМг–ФС30РЗМ30 призводить до суттєвої зміни характеру мікроструктури (рис. 3.4).



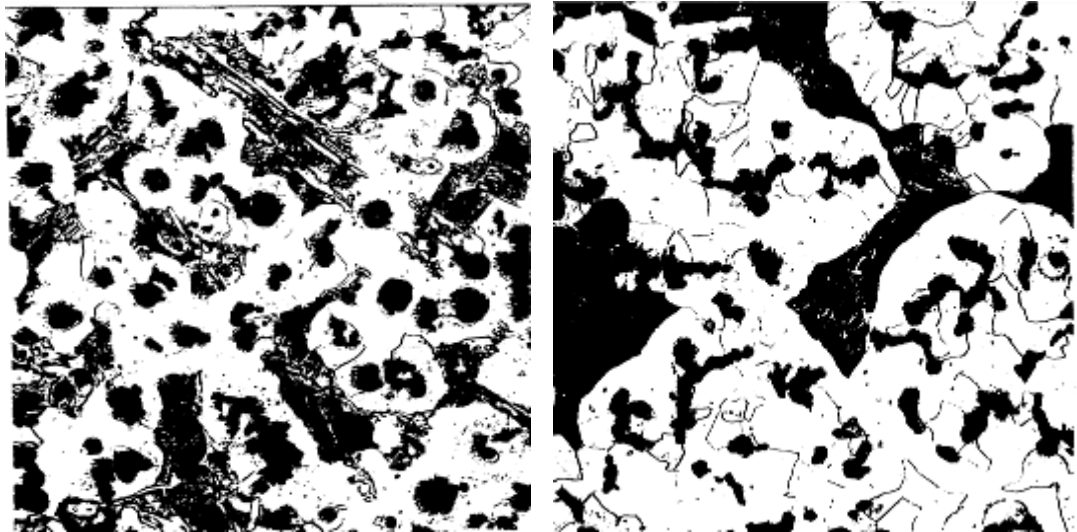
а

б

Рисунок 3.4 – Мікроструктура високоміцного чавуну після комплексного модифікування сумішшю 10 % ФС30РЗМ30 та 90 % ФСМг6 за питомої витрати $\Phi P = 0,050 \text{ кг/см}^2 \cdot \text{с}$: товщина зразків 5 мм (а) та 35 мм (б), $\times 200$.

Як видно з рис. 3.4, у структурі переважає вермикулярна форма графіту з рівномірним розподілом включень у металевій матриці. Кулясті включення або практично відсутні, або представлені у незначній кількості, що свідчить про стабілізацію модифікувальної дії магнію. Вермикулярні включення характеризуються укороченою, потовщеною формою з округленими краями та відсутністю переважного напрямку росту, що відповідає вимогам стандарту ISO 16112 для чавунів з вермикулярною формою графіту.

Порівняльний аналіз мікроструктур після різних видів модифікування (рис. 3.5) наочно демонструє ефективність комплексного підходу.



а

б

Рисунок 3.5 – Мікроструктура високоміцного чавуну, модифікованого у ковші комплексною лігатурою (10 % ФС30Р3М30 + 90 % ФСМг6) за витрати 0,6 %, залежно від товщини перерізу ступінчастої проби: 5 мм (а) та 35 мм (б), $\times 200$.

Представлені мікроструктури (рис. 3.5) ілюструють вплив масивності відливки та умов твердіння на морфологію графітових включень. У тонкому перерізі товщиною 5 мм (рис. 3.5, а) спостерігається переважно рівномірний розподіл компактних графітових включень з чітко вираженою вермикулярною морфологією. Включення характеризуються укороченою, потовщеною формою з округленими краями, що свідчить про достатню ефективність комплексного модифікування та сприятливі умови кристалізації за підвищеної швидкості охолодження.

У більш масивному перерізі товщиною 35 мм (рис. 3.5, б) внаслідок зниження швидкості охолодження спостерігається часткове укрупнення графітових включень та зростання їх розгалуженості. Разом з тим, застосування комплексної лігатури забезпечує збереження переважно вермикулярної морфології графіту без істотного переходу до пластинчастої або кулястої форми, що свідчить про стабілізуючу дію рідкоземельних елементів у складі модифікатора.

Порівняльний аналіз мікроструктур у різних перерізах показує, що комплексне ковшове модифікування дозволяє зменшити чутливість морфології графіту до масивності відливок та розширити допустимий інтервал умов твердіння. Це створює передумови для більш відтворюваного формування структури і стабільності механічних властивостей високоміцного чавуну у виробничих умовах.

У випадку модифікування лише лігатурою ФСМг структура характеризується поєднанням вермикулярних і кулястих форм графіту, тоді як при комплексному модифікуванні лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 формується більш однорідна структура з домінуванням вермикулярної морфології. Це свідчить про зменшення ймовірності надмірної сфероїдизації графіту та розширення технологічного інтервалу стабільного формування вермикулярної форми.

Кількісна оцінка морфології графітових включень, виконана з використанням показників фактора округлості RSF та ступеня сфероїдизації графіту (ССГ), підтверджує результати мікроструктурного аналізу. Для зразків, модифікованих комплексними лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30, значення RSF відповідають діапазону, характерному для вермикулярного графіту, тоді як значення ССГ не перевищують граничних рівнів, допустимих для чавунів з ВГ. Узагальнені результати кількісного аналізу структури наведені в табл. 1.2.

Таким чином, комплексне модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 забезпечує формування більш стабільної та однорідної вермикулярної морфології графіту порівняно з традиційним магнієвим модифікуванням. Отримані результати підтверджують доцільність використання комплексних лігатур для керування структурним станом високоміцного чавуну та створюють основу для подальшого аналізу впливу даного підходу на механічні властивості матеріалу, що розглядається в наступному підпункті.

3.3 Вплив комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на механічні властивості високоміцного чавуну

Механічні властивості високоміцного чавуну визначаються, насамперед, морфологією графітових включень і характером металевої матриці. Зміна форми графіту від пластинчастої до компактних морфологій супроводжується зниженням концентрації напружень у матриці та переходом до більш сприятливого механізму деформації і руйнування. У зв'язку з цим оцінка впливу комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 на механічні властивості є логічним продовженням аналізу структурних змін, розглянутих у п. 3.2.

Порівняльні результати механічних випробувань показують, що застосування лише магнієвмісної лігатури ФСМг забезпечує підвищення міцнісних характеристик чавуну порівняно з немодифікованим станом, однак отримані значення характеризуються підвищеним розсіюванням (рис. 3.6).

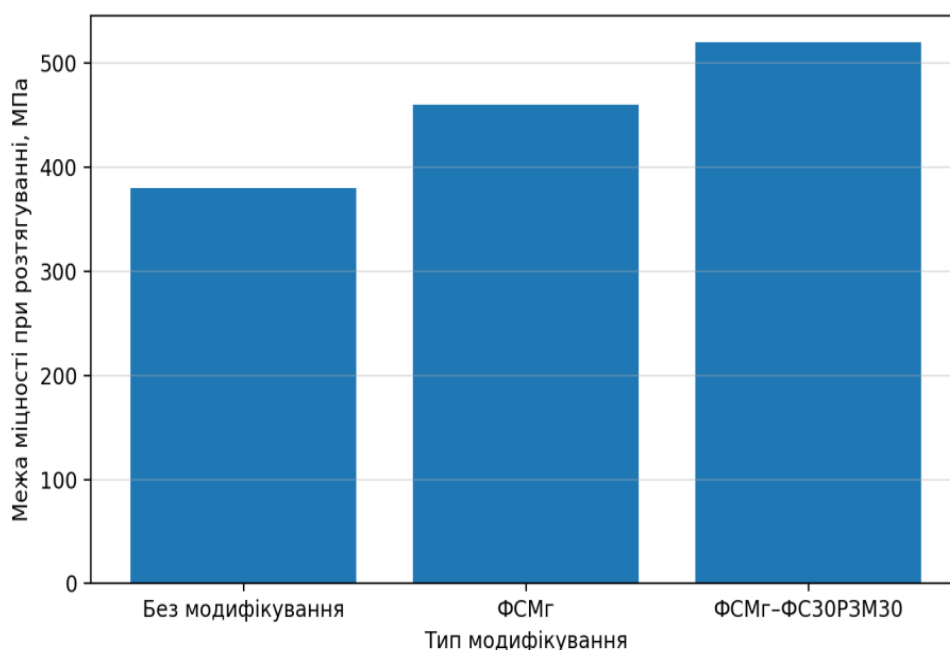


Рисунок 3.6 – Вплив типу модифікування на межу міцності при розтягуванні високоміцного чавуну

Як видно з рис. 3.6, застосування магнієвого модифікування призводить до зростання міцності порівняно з немодифікованим чавуном, однак найбільші значення та найкращу відтворюваність механічних властивостей забезпечує комплексне модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30.

Така нестабільність властивостей зумовлена неоднорідною морфологією графітових включень, коли у структурі одночасно присутні вермикулярні та кулясті форми графіту, що підтверджено результатами мікроструктурного аналізу (див. рис. 3.3).

Застосування комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 приводить до більш стабільного формування механічних властивостей. Як видно з рис. 3.6, для зразків після комплексного модифікування характерні вищі та більш відтворювані значення міцності порівняно з магнієвим модифікуванням. Це пов'язано з переважанням вермикулярної форми графіту з округленими краями та рівномірним розподілом включень у металевій матриці (див. рис. 3.4, 3.5), що знижує надрізуючий ефект і сприяє більш рівномірному розподілу напружень при навантаженні.

Аналіз твердості високоміцного чавуну залежно від типу модифікування (рис. 3.7) показує, що комплексне модифікування не супроводжується різким зростанням цього показника.

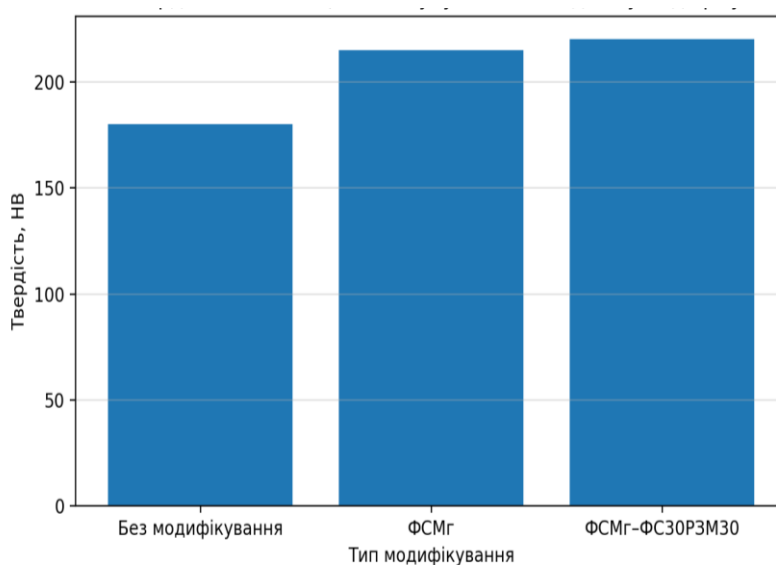


Рисунок 3.7 – Зміна твердості високоміцного чавуну залежно від типу модифікування

між морфологією графіту, структурним станом металевої матриці та механічними властивостями матеріалу.

Висновки до розділу 3

1. Встановлено, що застосування лише магнієвого модифікування (ФСМГ) призводить до значного розсіювання механічних властивостей високоміцного чавуну. Межа міцності при розтягуванні змінюється у широкому інтервалі, а відхилення значень для зразків однакової масивності може досягати 12...15 %, що зумовлено неоднорідною морфологією графітових включень.

2. Показано, що комплексне модифікування лігатурами ФСМГ–ФС30РЗМ30 забезпечує більш стабільне формування вермикулярної форми графіту, що супроводжується підвищенням середнього рівня межі міцності при розтягуванні приблизно на 8...12 % порівняно з магнієвим модифікуванням.

3. Встановлено, що зі збільшенням товщини стінки відливки для зразків після магнієвого модифікування спостерігається зниження межі міцності при розтягуванні на 15...20 %, тоді як при комплексному модифікуванні зменшення цього показника не перевищує 8...10 %, що свідчить про зниження чутливості властивостей до масивності відливок.

4. Аналіз твердості показав, що застосування комплексного модифікування не призводить до різкого зростання цього показника. Значення твердості змінюються не більше ніж на 5...7 %, що вказує на збереження оптимального співвідношення між міцністю та пластичністю матеріалу.

5. Виявлено, що комплексне модифікування зменшує розсіювання значень механічних властивостей: середньоквадратичне відхилення межі міцності при розтягуванні знижується приблизно у 1,5...2 рази порівняно з магнієвим модифікуванням.

6. Фрактографічний аналіз підтвердив, що підвищення та стабілізація механічних властивостей після комплексного модифікування супроводжується зміною механізму руйнування — від переважно крихкого до змішаного в'язко-пластичного, що корелює зі зменшенням концентрації напружень біля включень графіту.

7. Таким чином, комплексне модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 дозволяє не лише підвищити рівень механічних властивостей високоміцного чавуну, але й забезпечити їх відтворюваність, що є критично важливим для виготовлення відливок різної масивності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу літературних джерел встановлено, що морфологія графітових включень є визначальним структурним чинником, який формує механічні та експлуатаційні властивості високоміцного чавуну. Перехід від пластинчастої до компактних форм графіту супроводжується зменшенням концентрації напружень у металевій матриці та підвищенням міцнісних характеристик матеріалу.

2. Показано, що формування вермикулярної форми графіту характеризується вузьким технологічним інтервалом стабільного залишкового вмісту магнію та високою чутливістю до вмісту сірки, температури обробки розплаву і умов твердіння. За традиційного магнієвого модифікування це призводить до структурної нестабільності та значного розсіювання механічних властивостей.

3. Узагальнення теоретичних і технологічних положень дозволило обґрунтувати доцільність застосування комплексних модифікувальних лігатур, що поєднують магній з рідкоземельними елементами, як ефективного способу стабілізації морфології графіту у високоміцному чавуні.

4. Експериментальними дослідженнями встановлено, що комплексне модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 забезпечує більш однорідне та відтворюване формування вермикулярної морфології графіту порівняно з магнієвим модифікуванням, що підтверджено результатами металографічного аналізу.

5. Показано, що застосування комплексного модифікування приводить до підвищення середнього рівня межі міцності при розтягуванні приблизно на 8...12 %, а також до зменшення розсіювання механічних властивостей у 1,5...2 рази порівняно з традиційним магнієвим модифікуванням.

6. Встановлено, що масивність відливок істотно впливає на механічні властивості високоміцного чавуну. Для зразків після магнієвого модифікування зі збільшенням товщини стінки спостерігається зниження межі міцності на

15...20 %, тоді як при комплексному модифікуванні зменшення цього показника, як правило, не перевищує 8...10 %, що свідчить про зниження чутливості властивостей до умов твердіння.

7. Аналіз твердості показав, що комплексне модифікування не супроводжується різким підвищенням цього показника: зміна твердості не перевищує 5...7 %, що забезпечує сприятливе поєднання міцності та пластичності матеріалу без зростання крихкості.

8. Фрактографічні дослідження підтвердили, що стабілізація морфології графіту при комплексному модифікуванні супроводжується зміною механізму руйнування — від переважно крихкого до змішаного в'язко-пластичного, що корелює з підвищенням тріщиностійкості високоміцного чавуну.

9. Отримані результати експериментально підтверджують ефективність комплексного модифікування лігатурами ФСМг–ФС30РЗМ30 як технологічного підходу, що забезпечує підвищення рівня та відтворюваності механічних властивостей високоміцного чавуну при виготовленні відливок різної масивності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кропивний В. М., Кузик О. В., Босий М. В. Вплив модифікування на морфологію графіту та механічні властивості високоміцних чавунів // *Металознавство та обробка металів*. 2019. № 3. С. 25–32.
2. Кузик О. В. Формування структури та властивостей чавунів з компактними формами графіту : дис. ... канд. техн. наук. Кропивницький, 2018. 178 с.
3. Кропивний В. М., Аулін В. В. Структурні чинники формування експлуатаційних властивостей чавунів // *Вісник ХНАДУ*. 2017. Вип. 78. С. 112–118.
4. Босий М. В., Кропивний В. М. Роль рідкоземельних елементів у стабілізації структури високоміцних чавунів // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2020. № 2. С. 67–74.
5. Швець В. Д., Величко О. Л. Структурні особливості та механічні властивості чавунів з вермикулярним графітом // *Наукові нотатки ЛНТУ*. 2016. № 55. С. 141–147.
6. Аулін В. В., Кузик О. В. Модифікування чавунів: сучасні підходи та перспективи // *Литво. Металургія*. 2018. № 4. С. 9–15.
7. Кропивний В. М. Технологічні аспекти одержання чавунів з вермикулярним графітом // *Вісник КНТУ*. 2015. № 2. С. 88–95.
8. Босий М. В. Вплив Mg–PЗМ модифікування на стабільність структури чавунів // *Збірник наукових праць НТУ «ХП»*. 2021. № 1. С. 54–61.
9. Кузик О. В., Кропивний В. М. Масивність виливків і морфологія графіту у високоміцних чавунах // *Ливарне виробництво та металургія*. 2020. № 6. С. 21–27.
10. Бабенко М. І., Левченко В. В. Дослідження структури та властивостей чавунів з компактними формами графіту // *Машинознавство*. 2014. № 8. С. 29–34.

11. ДСТУ ГОСТ 3443-87. Виливки з чавуну з різною формою графіту. Методи визначення структури. Київ, 2009.
12. ДСТУ 3362-96. Лігатури залізо-кремній-магнієві. Технічні умови. Київ, 1997.
13. Кропівний В. М., Босий М. В. Металографічні критерії оцінки вермикулярного графіту // *Металургія*. 2018. № 1. С. 43–49.
14. Кузик О. В. Роль сірки у формуванні морфології графіту // *Науковий вісник НЛТУ України*. 2016. № 26. С. 121–126.
15. Аулін В. В., Кропівний В. М. Керування структурою чавунів при литті // *Вісник СНУ ім. В. Даля*. 2017. № 5. С. 99–105.
16. Босий М. В. Структурна стабільність чавунів з вермикулярним графітом // *Наукові праці ДонНТУ*. 2019. № 2. С. 61–67.
17. Кузик О. В., Швець В. Д. Механізми формування компактних форм графіту // *Вісник ТНТУ*. 2015. № 4. С. 83–90.
18. Кропівний В. М. Ливарні сплави з керованою структурою. Кропивницький : ЦНТУ, 2016. 212 с.
19. Босий М. В., Кузик О. В. Вплив РЗМ на відтворюваність властивостей чавунів // *Проблеми трибології*. 2020. № 3. С. 101–107.
20. Кропівний В. М., Аулін В. В. Фізико-металургійні основи модифікування чавунів // *Наукові вісті КПІ*. 2014. № 6. С. 56–62.
21. Stefanescu D. M. *Science and Engineering of Casting Solidification*. Springer, 2015. 556 p.
22. Stefanescu D. M., Alonso G. Vermicular graphite cast iron: Structure–property relationships // *International Journal of Cast Metals Research*. 2016. Vol. 29. P. 1–12.
23. Lacaze J., Sertucha J. L. Vermicular graphite formation mechanisms // *Materials Science and Engineering A*. 2014. Vol. 597. P. 1–8.
24. Dawson S. CGI technology and applications // *AFS Transactions*. 2012. Vol. 120. P. 345–356.

25. Alonso G., Stefanescu D. M. Role of Mg and rare earths in graphite morphology control // Metallurgical and Materials Transactions A. 2015. Vol. 46. P. 1234–1245.
26. Svensson I. Vermicular graphite iron for automotive applications // Materials & Design. 2013. Vol. 45. P. 44–52.
27. Riposan I., Chisamera M. Rare earth treatment of cast irons // China Foundry. 2017. Vol. 14. P. 1–12.
28. Riposan I. Graphite morphology control in cast irons // International Journal of Metalcasting. 2016. Vol. 10. P. 312–325.
29. Sertucha J. L. Solidification of CGI // Journal of Materials Processing Technology. 2012. Vol. 212. P. 1423–1430.
30. Heine R. W., Loper C. R., Rosenthal P. C. Principles of Metal Casting. McGraw-Hill, 2011. 492 p.
31. Campbell J. Complete Casting Handbook. Elsevier, 2015. 1024 p.
32. ASM Handbook. Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys. ASM International, 2018.
33. Svensson I., Dawson S. CGI microstructure control // AFS Transactions. 2014. Vol. 122. P. 77–86.
34. Alonso G. The effect of cooling rate on CGI // Materials Characterization. 2013. Vol. 84. P. 99–106.
35. Lacaze J. Nucleation and growth of graphite // Acta Materialia. 2012. Vol. 60. P. 2166–2176.
36. Chisamera M., Riposan I. Mg fading in cast irons // International Journal of Cast Metals Research. 2015. Vol. 28. P. 57–65.
37. Sertucha J. L., Suárez R. Microstructural stability of CGI // Materials Science Forum. 2016. Vol. 879. P. 132–137.
38. Stefanescu D. M. Compacted graphite iron: Past, present and future // International Journal of Metalcasting. 2018. Vol. 12. P. 5–20.
39. Riposan I. Rare earth metallurgy in cast irons // Journal of Materials Engineering and Performance. 2014. Vol. 23. P. 345–352.