

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю. М. ПОТЕБНИ

Кафедра металургії
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

(рівень вищої освіти)

на тему Технологічні особливості підвищення
характеристик зварювального шва

Виконав: студент _____ курсу, групи МЕТ-18-109
спеціальності 136 Металургія
(код і назва спеціальності)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Металургія
(назва освітньої програми)

О. К. Ясукас
(ініціали та прізвище)

Керівник професор, д.т.н. Скачків В.О.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент професор, д.т.н. Прутцьков О.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2022

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні _____
 Кафедра металургія
 Рівень вищої освіти _____
 Спеціальність 136 - металургія
(код та назва)
 Спеціалізація _____
(код та назва)
 Освітня програма металургія

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Завідувач кафедри [підпис]
 « _____ » 20 року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)**

Ясинас Олександр Костянтинівич
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Технологічні особливості
підвищення характеристик зварювального
з'єднання
 керівник роботи Скопко Віктор Олександрович, д.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
 затверджені наказом ЗНУ від « _____ » 20 року № _____



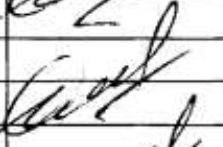

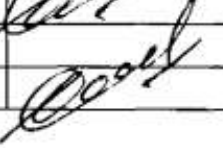

2 Строк подання студентом роботи _____

3 Вихідні дані до роботи зварювальний, ковкий,
високотемпературний з'єднання, технологія, література

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1. Структура та властивості з'єднань; 2. Особливості
лиття отливки; 3. Технологічні методи підвищення властивостей

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
Титульний лист, Форми структури, властивості з'єднань
механічні властивості, хімічний склад, хімічний
склад зварювального з'єднання, мікроструктура з'єднання, порівняльні
характеристики, висновки

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1. Зосильна			
частина	Скачок В.О.		
2. Технологі-			
з'ємна			
частина	Скачок В.О.		
3. Розрахунк-			
кова	Скачок В.О.		

7 Дата видачі завдання _____

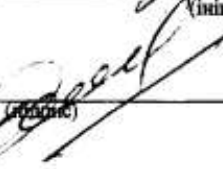
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Зосильна частина	05.05.2022	
2	Технологічна частина	20.05.2022	
3	Розрахункова частина	01.06.2022	
4	Оформлення пояснювальної записки	10.06.2022	

Студент


(підпис)Ясукос В.К.
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту)


(підпис)Скачок В.О.
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер


(підпис)

(ініціали)

та

прізви

РЕФЕРАТ

Розрахунково – пояснювальна записка: 56 сторінок, 16 рисунків, 13 таблиць і 18 літературних джерела.

СІРИЙ ЧУГУН, КІВЧИЙ ЧУГУН, ВИСОКОМІЦНИЙ ЧУГУН,
МОДИФІКАТОРИ, ЛІГАТУРИ, МІКРОСТРУКТУРА

Тема бакалаврської роботи: «Технологічні особливості підвищення характеристик заєвтектичного чавуну».

Мета роботи – дослідження технологічних особливостей отримання великогабаритних виливків на основі модифікованого передільного чавуну.

У загальній частині представлено основні властивості, технологія та застосування сірих, білих, ковких та високоміцних видів чавуну, способи його виробництва та економічна оцінка цих способів.

В іншій частині представлено технологію отримання виливків різними методами лиття, сировинні матеріали та їх підготовку.

У третій частині наведено питання за впливом модифікаторів на структуру та властивості високоміцних видів чавуну, розробку нового виду модифікаторів та експериментальну перевірку їх ефективності.

Зміст

	стр
Вступ	5
1 Структура, властивості та технології чавунів та сплавів	7
1.1 Структура та технологічні властивості чавуну	7
1.2. Види та властивості чавуну	11
1.3 Процеси легування та модифікації чавуну	19
1.4 Вплив температурно-часових режимів на властивості чавуну	21
2 Особливості лиття складних оливок із високоміцних чавунів	24
2.1 Залежність ливарних властивостей чавуну від хімічного складу	24
2.2 Види та технології лиття чавуну	26
2.3 Особливості лиття за моделями, що виплавляються.	30
3 Технологічні методи підвищення характеристик чавуну	32
3.1 Удосконалення складу та властивостей переділового чавунку	32
3.1.1 Особливості модифікування розподільного чавунку	32
3.1.2 Одержання виливків з чавуну на основі сфероїдизуючих та модифікуючих компонентів	34
3.2 Модифікація нанорозмірними частинками карбідів	41
3.3 Удосконалення структури та властивості модифікованого переділового чавуну	45
3.3.1 Загальні характеристики вихідних великогабаритних виливків	
3.3.2 Структура та властивості виливків із модифікованого переділового чавуну	45
Список літератури	55

Вступ

Сірий чавун є найпоширенішим металом для виливки вузлів та деталей у машинобудівному виробництві – від двигунів внутрішнього згорання.

Високий вміст вуглецю в структурі чавуну значно підвищує основні ливарні характеристики чавуну: знижує температуру плавлення, підвищує рідину і, найголовніше, зменшує усадку в процесі кристалізації. Включення графіту пластинчастої форми виконують у структурі структури чавуну роль концентраторів напруг і значно знижують механічні характеристики. Внаслідок цього в чавунних виливках значно менше, ніж у сталевих, небезпечні надрізи, дрібні раковини, пори та неметалічні включення. .

Більш високими механічними властивостями володіють високоміцні чавуни з кулястою формою графіту, а також ковкі чавуни з пластівцеподібною формою графіту.

З метою підвищення функціональних характеристик чавунів застосовується легування, яке надає виливкам спеціальні властивості: зносостійкість, стійкість проти корозії, термохімічної стійкості. Досить часто застосовуються високолеговані хромисті, крем'янисті, алюмінієві, марганцеві та нікелеві чавуни.

У виробництві великогабаритних виливків з високоміцного чавуну з кулястим або пластів'я графітом використовується модифікування металевим магнієм або його сплавами. Магній та сплави на його основі є найбільш найбільш економічними сфероїдизаторами [1]. Магній використовується у вигляді металу, у складі сплавів чи брикетів [2].

Значне вдосконалення структури та властивостей чавунів забезпечується шляхом модифікування рідкісноземельними металами.

Комплексні модифікатори на основі рідкісноземельних металів формуються у вигляді нових сплавів і знаходять все ширше застосування [3, 4].

В даний час для модифікування великогабаритних виливків їх високоміцних чавунів застосовуються модифікуючі присадки, які використовуються для

високоміцних чавунів як з кулястими так і пластівцевими формами графіту [5]. Досить часто використовуються сплави рідкісноземельних металів з добавками церію або ітрію. Такі модифікатори дорогі, але дуже впливають на отримання спеціальної структури у виливках з високоміцного чавуну.

Області застосування низьколегованих та високолегованих чавунів дуже різноманітні. З чавунів, легованих спільно нікелем, хромом та вольфрамом, відливають штампи; із чавуну з одним відсотком нікелю та 0,25% Cr — базові деталі металорізальних верстатів високої точності; з чавунів, комплексно легованих Ni, Cr, Mo і Cu - циліндри автомобільних двигунів і т.д.

1 Структура, властивості та технології чавунів та сплавів

1.1 Структура та технологічні властивості чавуну

Чавуни є сплавом заліза, що містить більше 2,14% вуглецю і ряд інших елементів. Розрізняються дві групи чавунів, які є первинними продуктами переробки залізних руд і продуктами, що виплавляються в ливарних цехах.

Доменні чавуни поділяються на ливарні та передільні. Понад 80% доменних чавунів становлять передні, які призначені для переробки на сталь у металургійних заводах. З доменних ливарних чавунів проводиться виплавка виливків.

Структура і властивості чавуну визначаються видом вуглецю, що міститься в ньому - вільному або пов'язаному.

Вільний вуглець у чавуні є рівномірно розподіленими у включеннях графіту, який має малу міцність і твердість, має різну форму пластинчасту, кулясту, пластівцеву або вермікулярну (рис.1.1). Пов'язаний вуглець знаходиться у вигляді хімічної сполуки Fe_3C цементиту.

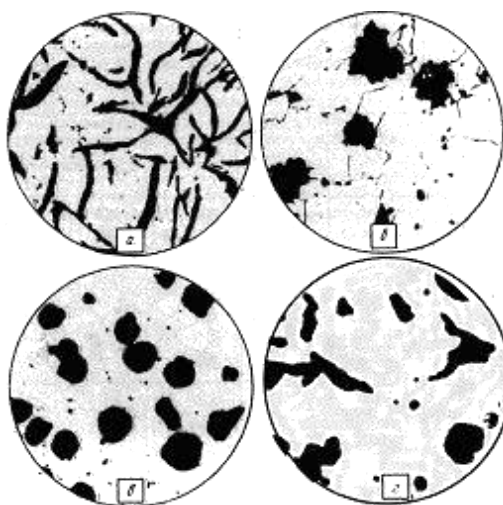


Рисунок 1.1. Форми включень вільного графіту: а) пластинчаста; б) пластівцева; в) куляста г) вермікулярна

Включення графіту пластинчастої форми впливають на структуру чавуну як концентратори напруг і значно знижують механічну міцність та пластичність. Включення графіту в чавуні є мікроконцентраторами внутрішньої напруги, сприяючи розподілу їх у масі виливки. Тому в чавунних деталях менше, ніж у сталевих, небезпечні різні надрізи, дрібні раковини, пори та неметалеві включення. Для чавунних виливків менш небезпечні різкі переходи між окремими стінками та іншими конструктивними елементами, в яких можуть концентруватися значні напруження, що призводять до руйнування.

Більш високими механічними властивостями володіють високоміцні чавуни з кулястою формою графіту і ковкі чавуни з пластівцеподібною формою графіту.

Підвищений вміст вуглецю в чавуні значно підвищує ливарні властивості чавуну: знижує температуру плавлення, підвищує рідину, зменшує кристалізаційну усадку. У зв'язку з цим з чавуну виходять тонкостінніші виливки, менше витрачається металу на литникові системи та прибутку. Сірий чавун дешевший і простіше приготування сталі. Отримані з нього виливки менш схильні до короблення та утворення тріщин, менше взаємодіють з поверхнею піщаної форми при кристалізації та охолодженні в ній, тому вони мають більш якісну поверхню.

Сірий чавун є поширеним металом для відливання різних машинобудівних деталей - від багатотонних станин верстатів та великогабаритних установок до блоків автомобільних двигунів.

До основних фаз, що становлять структури різних чавунів крім графіту відносяться ферит, цементит, перліт, аустеніт, ледебурит. У чавунах залізо існує у вигляді α , γ і δ - алотропних модифікацій, що розрізняються за кристалічною структурою та за магнітними властивостями

Феррит представляється твердим розчином вуглецю (до 0,02%) в залізі і існує від 0° до 910° . До температури 769°C ферит має магнітні властивості. В інтервалі температур від 910°C до 1392°C ферит переходить у γ -залізо-аустеніт. В інтервалі температур від 1392°C до 1539°C утворюється стійке δ -залізо. У ферит розчиняються також кремній, марганець, фосфор та інші елементи. Чистий ферит м'який і пластичний, деякі домішки, що

легують, підвищують його міцність, твердість, крихкість. Цементит представляє собою хімічне соединение карбид заліза (Fe_3C), містить 93,33% заліза та 6,67% вуглецю. Цементит є найбільш твердою та тендітною складовою чавунів.

Перліт являє собою евтектоїдну механічну суміш цементиту та фериту. Частинки цементиту, що знаходяться в пластичній масі фериту, надають цій механічній суміші високих властивостей міцності. У перліті міститься 0,83% вуглецю.

Аустеніт є твердим розчином вуглецю в α -залізі. Аустеніт не має магнітних властивостей.

Ледебурит утворюється при температурах нижче 1145°C утворює евтектичну механічну суміш аустеніту і цементиту. Вміст вуглецю в ледебуріті становить 4,3%. При нормальній температурі ледебурит є сумішшю цементиту і перліту.

Мартенсит має мікроструктуру голчастого вигляду, яка надає сплаву дуже високу твердість. Мартенсит є твердим пересиченим розчином вуглецю в α -залозі.

На формування структури чавунних виливків впливає хімічний склад чавуну, температура перегріву перед заливкою у форму та швидкість охолодження виливка у формі.

За змістом графіту виділяються три види чавунів – доевтектичні, евтектичні та заевтектичні.

Чавуни називаються доевтектичними якщо вміст у них вуглецю знаходиться в межах від 2,14 до 4,3%. Структура доевтектичних чавунів

складається комбінацією перліту, цементиту та ледебуриту.

Евтектичні чавуни містять 4,3% вуглецю та складаються з евтектики – ледебуриду перлітового.

Заевтектичні чавуни містять вуглецю в межах від 4,3 до 6,67%. Структура заевтектичних чавунів складається з перлітового ледебуриду і цементиту первинного.

Кристалізація доевтектичних чавунів починається нижче лінії ліквідусу з утворення аустеніту. У міру кристалізації аустеніту рідкий розчин збагачується вуглецем і при температурі 11470 досягне значення 4,3%. Кристалізація доевтектичних чавунів закінчується на прямолінійній ділянці лінії солідуса з одночасною кристалізацією аустеніту та цементиту та утворенням ледебуриду.

Евтектичний чавун, що містить 4,3% вуглецю, кристалізується при постійній температурі 11470 з утворенням евтектики, що складається з гранично насиченого вуглецем аустеніту (2,14%) і цементиту. Кристалізація заевтектичних чавунів починається на лінії ліквідусу з кристалізацією з рідкого розплаву тонких пластинчастих кристалів первинного цементу. Зі зниженням температури у складі рідини зменшується вміст вуглецю по лінії ліквідусу. При температурі 11470 С концентрація вуглецю в рідкому сплаві досягне 4,3% і він твердне з утворенням евтектики – ледебуриду.

Коли залізовуглецеві сплави знаходяться в твердому стані нижче лінії солідуса подальші перетворення при зниженні температури обумовлені поліморфізмом заліза і зміною розчинності вуглецю в γ -Fe і α -Fe. На рівні перлітових перетворень при 7270 С аустеніт, що містить 0,8% вуглецю, розпадається та утворюється перліт. Структуру металу у виливку можна змінити також тепловою обробкою.

1.2. Види та властивості чавуну

За хімічним складом види чавуну поділяються на нелеговані та леговані. У широко поширених чавунах міститься в межах 2,4-3,6% вуглецю, 0,5-3% кремнію, 0,2-1,0% марганцю, 0,04-0,8% фосфору, 0,02-0,2% сірки, інше, до 100% - залізо.

Основні та легуючі хімічні елементи мають різний вплив на процес графітизації чавуну. До легуючих хімічних елементів часто відносяться Al, C, Si, Ti, Ni, Cu, P, Zr, Nb, W, Mn, Mo, S, Cr, V, Ti, Mg, Sr, B. Постійно присутні в чавуні компоненти C і Si мають сильну графітуючу дію, у той час як Mn і S сильно загальмовують виділення вільного графіту.

Схематичне зображення структур показано на рис. 1.1. При тому самому вмісті вуглецю в межах 3,0% може виходити білий чавун, якщо вміст кремнію не перевищує 0,8%, сірий перлітний чавун при вмісті Si в межах від 1,1 до 2% і при його вмісті вище 2, 8% утворюється сірий феритний чавун.

Методом регулювання сумарної кількості вуглецю і кремнію в розплаві чавуну, а також швидкістю охолодження розплаву чавуну у формі, можна отримувати виливки з різною структурою.

Феритний сірий чавун має маломіцну феритну основу, значно ослаблену великим вмістом великих включень графіту пластинчастого (див. рис.1.2). Основні переваги сірого чавуну полягають у його дешевизні, простоті отримання, володінні хорошими ливарними властивостями.

Структура перлітно-феритного сірого чавуну – СЧ відрізняється тим, що у перлітній металевій основі утворюються включення фериту, в яких розташовані дрібні пластинки графіту (див. рис.1.2). Перлітно-феритний сірий чавун широко використовують для виготовлення різноманітних

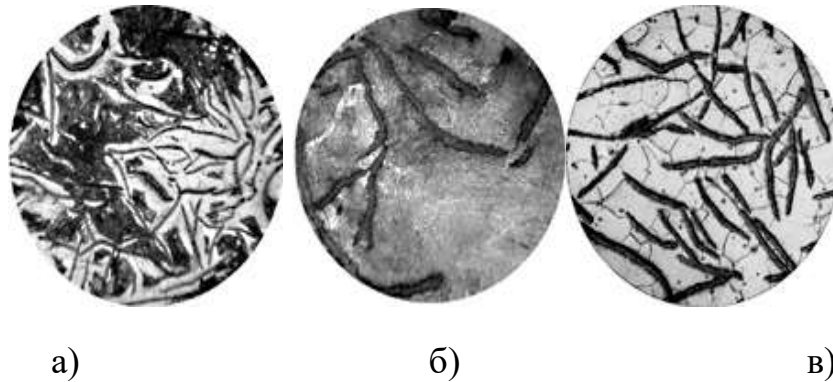


Рисунок 1.2 Сірі чавуни з різними видами металевих фаз
а) феритного; б) феритно-перлітного; в) перлітного.

деталей сільськогосподарських та дорожніх машин, автомобілів та тракторів, вузлів та елементів верстатів, насосів. Такий чавун має досить високу міцність і має гарні ливарні властивості.

Перлітний сірий чавун має вищі міцні властивості, ферит у його структурі відсутній, а включення графіту містяться в меншій кількості з дрібнішими розмірами (див. рис.1.2). Перлітний сірий чавун часто використовують для одержання навантажених великогабаритних виливків – деталей компресорів, турбін, тепловозів, насосів.

Міцність та пластичність сірих чавунів можна наблизити до властивостей сталі методами модифікування, легування, а також термічною обробкою чавуну. При одночасному збереженні кращих, ніж у сталі, ливарних властивостей. Основні властивості сірих чавунів представлені у табл. 1.1

Білий чавун, на відміну від сірого, не містить у структурі вільного графіту (див. рис.1.3). Структура білого чавуну складається з перліту та цементиту, має світлий, блискучий злам. Білий чавун досить твердий і тендітний, практично не піддається механічній обробці, добре протистоїть стирання. Тому з білого чавуну відливають такі деталі, як лопат

Таблиця 1.1 Межа міцності та хімічний склад сірих чавунів

Марки чавуну	Межа міцності σ_B , МПа	C	Si	Mn	P	S
СЧ 10	100	3,5–3,7	2,2–2,6	0,5–0,8	0,3	0,15
СЧ 15	150	3,5–3,7	2,0–2,4	0,5–0,8	0,2	0,15
СЧ 20	200	3,3–3,5	1,4–2,4	0,7–1,0	0,2	0,15
СЧ 25	250	3,2–3,4	1,4–2,2	0,7–1,0	0,2	0,15
СЧ 30	300	3,0–3,2	1,3–1,9	0,7–1,0	0,2	0,12
СЧ 35	350	2,9–3,0	1,2–1,5	0,7–1,1	0,2	0,12

дробометних апаратів, щокі камнедробилок, зірочки для очищення металевих деталей в галтувальні барабани та ін.

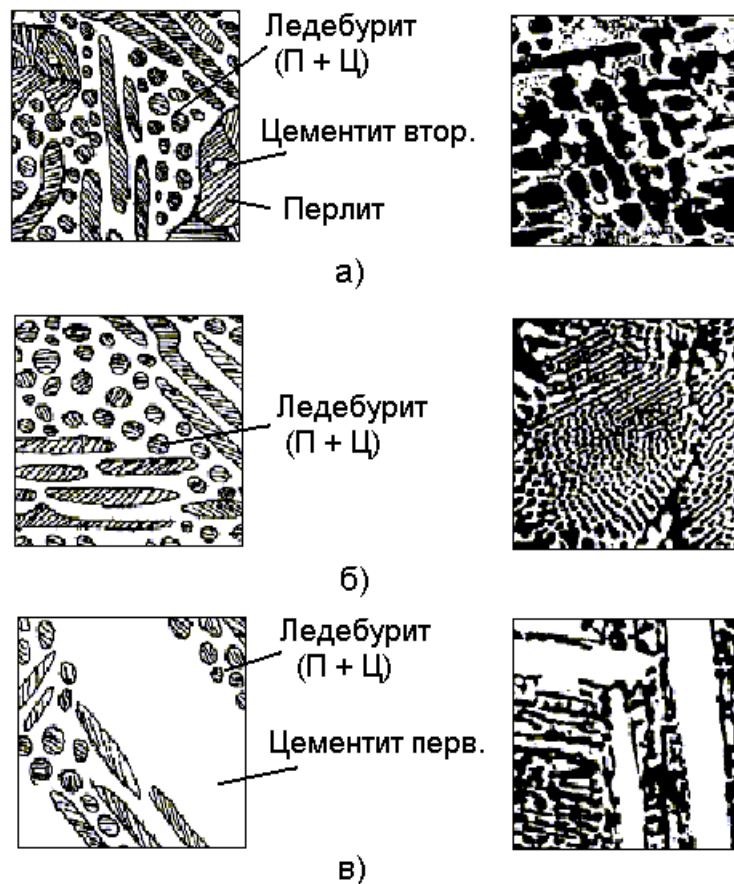


Рисунок 1.3 Фазовий склад білих чавунів

а) доєвтектичний; б) евтектичний; в) заєвтектичний.

Структура білого чавуну утворюється при малому вмісті в ньому кремнію та інших графітуючих елементів. Утворенню такої структури значною мірою сприяє швидке охолодження виливків. Це використовують при отриманні деяких деталей, наприклад прокатних валків, що застосовуються для обробки металу та у виробництві паперу, вживаючи заходів до того, щоб у таких виливків, званих вибіленими або загартованими, серцевина мала структуру сірого чавуну досить в'язкого, для того щоб витримувати ударні навантаження, а робочий поверхневий шар – структуру білого чавуну.

Значно частіше білий чавун використовують як проміжний матеріал для подальшої переробки на ковкий чавун. (КЧ), з якого виготовляються багато навантажених деталей машин і механізмів. Назва «ковкий» чавун обумовлюється його значно більшою пластичністю і в'язкістю в порівнянні з сірим чавуном.

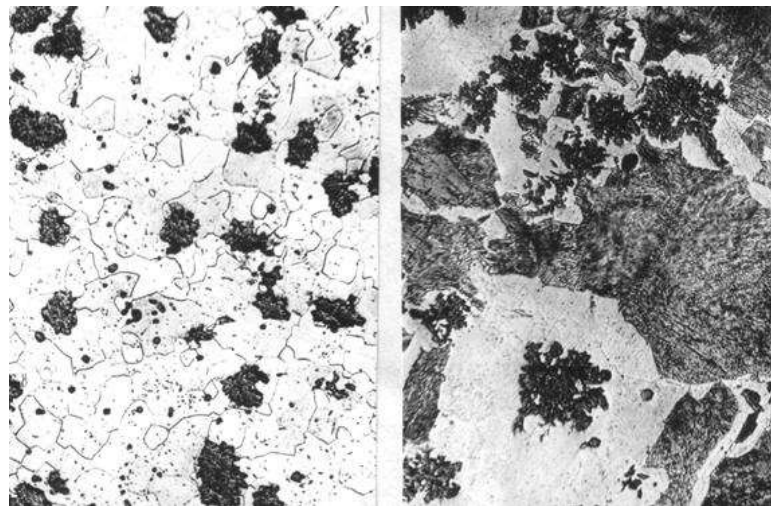
Технологія отримання ковкого чавуну полягає у виливці деталі з білого чавуну, з подальшою термічною обробкою. Внаслідок термічної обробки відбувається розкладання базової структурної фази білого чавуну – цементиту.

Розробка технології виливки деталей з ковкого чавуну повинна враховувати велику усадку вихідного білого чавуну. З огляду на цей факт необхідно передбачати у заливальних формах спеціальні відвідні прибутки для живлення масивних вузлів виливків. Наведені особливості виливки деталей з ковкого чавуну суттєво обмежують сфери застосування цього процесу.

Залежно від хімічного складу білого чавуну та режиму відпалу можливе отримання двох основних різновидів ковкого чавуну зі структурами металевої фази на основі феритної та перлітної складової. На рис. 1.4

представлена мікроструктура ковких чавунів на феритній (Ф) та перлітній (П) основах.

У всіх різновидах КЧ, що виділяється в них при відпалі, вуглець має пластівцеву форму. Цей факт і визначає властивості ковкого чунуна як проміжні між сталлю та сірим чавуном. Хороші механічні властивості ковких чавунів у поєднанні з високою рідинною плівкою вихідного чавуну зумовили їх використання для виготовлення широкої номенклатури дрібних, тонкостінних виливків для автомобілів, тракторів, сільськогосподарських



а)

б)

Рисунок 1.4. Мікроструктури ковкого чавуну.

а) феритного класу; б) перлітного класу

машин, а також арматури та інших деталей масового виробництва. Властивості ковких чавунів представлені у табл. 1.2.

Феритний КЧ має гарну пластичність, успішно витримує ударні навантаження. Перлітний ковкий чавун має високу міцність і зносостійкість. Зносостійкість може бути підвищена легуванням. Пластичність перлітного чавуну на середньому рівні.

Таблиця.1.2. Властивості ковких чавунів основних марок

Марки чугуна	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %,	Твёрдость по Бринеллю, НВ
КЧ 30-6	294	6	100–163
КЧ 35-10	333	10	100–163
КЧ 45-7	441	7	150–207
КЧ 55-4	539	4	192–241
КЧ 65-3	637	3	212–269
КЧ 70-2	686	2	241–285
КЧ80-1,5	784	1,5	270–320

Ковкий чавун застосовують для виготовлення дрібних, тонкостінних виливків для сільськогосподарських машин та автомобілів. Вироби з ковкого чавуну маркують двома літерами КЧ та двома цифрами – перша відповідає тимчасовому опору, друга – відносному подовженню, %.

У більшості випадків виявляється значно економічнішим отримання виливків з високоміцних чавунів з кулястою формою графіту (див. рис.1.5). На рис.1.5 представлена мікроструктура високоміцного магнієвого чавуну на металевій основі феритно-перлітного типу. Чорним виділені кулясті включення графіту оточені світлим шаром фериту, які розподілені у темній перлітній матриці.

Одержання виливків із високоміцного чавуну не обмежується товщиною стінки та масою виливки. Високоміцний чавун широко застосовується для виливки деталей металургійного обладнання, деталей та вузлів сучасного машинобудування, до яких пред'являються спеціальні вимоги щодо жорсткості, міцності, жаростійкості

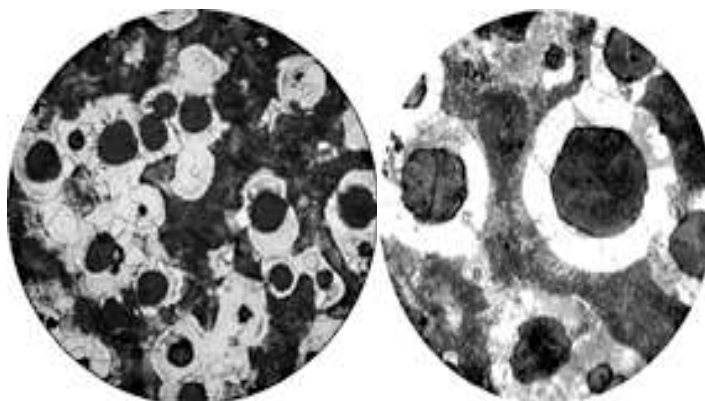


Рисунок 1.5 Види мікроструктури високоміцного чавуну

Високоміцний чавун маркується літерами ВЧ та цифрою, яка вказує на значення величини тимчасового опору при розтягуванні. В даний час широко поширені спеціальні антифрикційні чавуни. Антифрикційні чавуни мають перлітну або перлітно-феритну металеву фазу і містять легуючі добавки на основі міді, хрому, нікелю, титану, алюмінію та ін.

Антифрикційні чавуни зможуть замінити більш дорогі та дефіцитні сплави на основі кольорових металів, що працюють в умовах тертя з підвищеними швидкостями ковзання.

Високоміцний чавун з кулястим графітом використовується для отримання виливків відповідального призначення для високонавантажених колінчастих валів двигунів внутрішнього згорання, деталей турбін, які експлуатуються в умовах ударних, знакозмінних навантажень, шатуни, прокатні валки та ін.

Механічні властивості високоміцних чавунів представлені у таблиці 1.3., у табл.1.4 – хімічний склад.

Таблиця 1.3.. Механічні властивості високоміцних чавунів

Марки чавуна	Межа міцності, σ_B , МПа	Умовна межа плинності $\sigma_{0,2}$, МПа	Відносне подовження δ , %	Твердість за Брінеллем, НВ
ВЧ 35	350	220	22	140–170
ВЧ 40	400	250	15	140–202
ВЧ 45	450	310	10	140–225
ВЧ 50	500	320	7	153–245
ВЧ 60	600	370	3	192–277
ВЧ 70	700	420	2	228–302
ВЧ 80	800	480	2	248–351

У сучасному машинобудуванні найчастіше застосовують чавун із вермікулярним графітом, що має переважно феритну основу. Як впливає з рис. 1.1г, вермікулярна форма включень графіту займає проміжне положення між пластинчастою (див. рис.1.1а), пластів'ї (див. рис.1.1б) і кулястої (рис. 1.1в). Виходячи зі структури чавун з вермікулярним графітом має вищі міцнісні властивості, ніж чавун з графітом пластинчастої форми, проте значно нижче, ніж високоміцний чавун з кулястим графітом.

Таблиця 1.4. Хімічний склад високоміцних чавунів (% мас.)

Марки чавуна	C	Si	Mn	P	S	Cr	Другие
ВЧ 35	3,3-3,8	1,9-2,9	0,2-0,6	0,1	0,02	0,05	-
ВЧ 45	3,3-3,8	1,9-2,9	0,3-0,6	0,1	0,02	0,1	-
ВЧ 50	3,2-3,7	1,9-2,9	0,3-0,7	0,1	0,02	0,15	-
ВЧ 60	3,2-3,6	2,4-2,6	0,4-0,7	0,1	0,02	0,15	0,3 Cu 0,4 Ni
ВЧ 70	3,2-3,6	2,6-2,9	0,4-0,7	0,1	0,015	0,15	0,4 Cu 0,6 Ni
ВЧ 80	3,2-3,6	2,6-2,9	0,4-0,7	0,1	0,01	0,15	0,6 Cu 0,6 Ni

Чавун з вермікулярним графітом зазвичай виплавляється із чистих шихтових матеріалів, що містять досить малу кількість сірки. При виплавці чавуну з вермікулярним графітом застосовуються легуючі добавки, які у невеликих кількостях містять ванадію, мідь, титан.

1.3 Процеси легування та модифікації чавуну

Легування чавунів застосовується з метою підвищення їх функціональних характеристик, у тому числі міцності, надання виливкам спеціальних властивостей: зносостійкості, стійкості проти корозії в агресивних середовищах, термохімічної стійкості і т. д. Найбільш часто застосовуються низько-і високолеговані хромисті, крем'янисті, алюмінієві, марганцеві та нікелеві чавуни.

У виробництві великогабаритних виливків із чавуну із кулястим графітом використовується модифікування металевим магнієм. Магній та сплави на його основі є найбільш економічними сфероїдизаторами [1].

Магній використовується у вигляді металу, у складі сплавів чи брикетів [2]. Модифікування металевим магнієм обмежується складністю технології його застосування та в сучасних умовах використовується обмежено.

Значне вдосконалення структури та властивостей чавунів забезпечується шляхом модифікування їх рідкісноземельними металами. Модифікація сірих чавунів проводиться в основному рідкісноземельними металами та магнієм. Комплексні модифікатори на основі рідкісноземельних металів знаходять все ширше застосування [3, 4].

Останнім часом для модифікування великогабаритних виливків застосовуються модифікуючі присадки, які використовуються і для від- Біленні та для високоміцних чавунів [5]. Досить часто використовуються

сплави рідкісноземельних металів з добавками церію або ітрію. Це комплексні модифікатори. Такі модифікатори є дорогими і впливають на отримання карбідної фази в структурі високоміцного чавуну.

Сірі чавуни з пластинчастим графітом, леговані великою кількістю компонентів набувають різноманітних спеціальних властивостей. Немагнітні виливки для електромашинобудування з аустенітною структурою металевої основи відливаються з чавуну, що містить до 7,0% марганцю і до 12% нікелю. Для відливання ряду корозійностійких деталей хімічного машинобудування, що працюють в умовах впливу сірчаної, оцтової, мурашиної кислот, каустичної соди, деяких солей та лугів, а також морської води, використовується чавун, легований молібденом, міддю, нікелем та хромом.

Модифікування чавуну полягає в тому, що при розливі чавуну в його розплав вводяться добавки-модифікатори, що подрібнюють структурні складові чавуну або викликають зміну форми включень графіту.

Без запровадження модифікаторів у структурі чавуну при кристалізації утворюється цементит. Введений модифікатор прискорює процес графітизації, при цьому графіт виділяється у вигляді дрібних включень. В результаті досягаються більш високі механічні властивості металу виливків, а розмінююча дія включень графіту проявляється меншою мірою.

Найбільш ефективно модифікування сірого чавуну магнієм або його сплавами, під впливом якого графіт, що виділяється при кристалізації виливки, набуває кулястої форми, а чавун стає високоміцним (ВЧ). Найбільшого застосування отримав магній, при вмісті якого в межах 0,03–0,05 % графіт формується у вигляді кулястих включень. Такий чавун називається магнієвим.

Магнієвий чавун за механічними характеристиками наближається до конструкційних вуглецевих сталей, при цьому має ряд переваг: дешевше, плавиться при нижчій температурі, має вищі ливарні властивості, менш схильний до утворення тріщин, пригару, має меншу щільність і краще обробляється різанням.

Для отримання виливків із високоміцного чавуну з кулястим графітом застосовується модифікування церієм, який вводиться у вигляді невеликих шматків безпосередньо в ківш. Витрата церію становить трохи більше 0,3% від маси розплаву чавуну. За функціональними характеристиками церієвий чавун перевершує магнієвий.

В даний час застосовують також чавуни, модифіковані невеликою кількістю рідкісноземельних елементів. Області застосування низьколегованих чавунів дуже різноманітні. Так, з чавунів, легуваних спільно нікелем (до 1,75%), хромом (до 0,8%) та вольфрамом (0,2%), відливають штампи; із чавуну з одним відсотком нікелю та 0,25% Cr — базові деталі металорізальних верстатів високої точності; з чавунів, комплексно легуваних Ni, Cr, Mo і Cu - циліндри автомобільних двигунів і т.д.

1.4 Вплив температурно-часових режимів на властивості чавуну

Нагрів рідкого чавуну до температури вище лінії ліквідус супроводжується поступовим розчиненням включень графіту та кристалів цементиту. При невеликому перегріві розплаву чавуну вище лінії ліквідус і виливки його форму формуються великі пластинки графіту. При більшій величині перегріву пластівки графіту стають значно дрібнішими. Отже, що стоїть температура перегріву розплаву чавуну, тим досконаліше розподіл атомів вуглецю у структурі атомів заліза. У разі високого перегріву до

температури 1450°С чавуні з'являється більше зв'язаного вуглецю. При цьому платівки графіту стають дрібними, а функціональні властивості чавуну з підвищенням температури перегріву покращуються.

З підвищенням температури розплаву чавуну збільшується інтенсивність окислення кремнію і марганцю так і вуглецю. Перегрів розплаву чавуну в відбивній або електричній печі супроводжується спочатку спінюванням шлаку, а потім і кипінням ванни. Це сильно впливає не тільки на подрібнення частинок графіту, але і на рясна окислення вуглецю.

Помірно високий перегрів розплаву чавуну до 1450°С є корисною операцією, що призводить до подрібнення величини первинного зерна аустеніту та графіту в чавуні доевтектичного складу. Температура заливки ливарних форм визначається товщиною стінок виливків. Що менше товщина стін, то вище має бути температура заливки. Швидкість охолодження виливків залежить від типу форми, які бувають піщано-глинистими у сухому вигляді, піщано-глинистими у сирому стані та металевими. Чим повільніше відбувається кристалізація чавуну, тим більші первинні зерна аустеніту в доевтектичному чавуні і первинні зерна графіту або цементиту в чавуні заевтектичного складу. Обсяг, величина, форма та розподіл вільних графітових структур залежить від швидкості кристалізації розплаву чавуну. При максимальній швидкості кристалізації чавун може формувати структуру білого. Кількість вільного графіту наближається до нуля, а вуглець перебуває у зв'язаному вигляді формі цементиту.

При зниженні швидкості кристалізації формується «половинчастий» чавун, у якому частина металу кристалізується як білого, а частина металу як сірого чавуну. У цьому формується сітчаста чи дендритна структура графіту. При подальшому зниженні швидкості кристалізації розплаву чавун стає сірим. Графіт при цьому виділяється у змішаному вигляді: у формі пластинчастого та евтектичного графіту. При ще більшому зниженні

швидкості кристалізації графіт виділяється у формі завихрених пластинок або у вигляді прямих пластинок на феритовій металевій основі. При подальшому зниженні швидкості охолодження розмір прямих пластинок графіту стає більшим.

Швидкість кристалізації зовнішнього тонкого шару виливки в кілька разів вище за центральні шари, тому будова чавуну в поперечному перерізі стає неоднорідною. Зовнішній шар може стати у вигляді білого, а середні та центральні шари у вигляді сірого чавуну. Така картина спостерігається і в поздовжньому перерізі експериментальної клинної проби. Структура чавуну перед заливкою ливарної форми визначається виходячи з зламу експериментального пробного клина.

Термічна обробка сірих чавунів може істотно змінити їхню структуру та функціональні властивості. У виливках з високоміцного чавуну на основі феритно-перлітно-графітової структури з переважною складовою фериту до 75-80% методом загартування струмами високої частоти до 975-1000 ° C зі швидким охолодженням можна отримати в загартованому шарі однорідну структуру мартенситу.

2 Особливості лиття складних оливок із високоміцних чавунів

2.1 Залежність ливарних властивостей чавуну від хімічного складу

Хімічний склад чавуну надає значний вплив на графітизацію та формування фаз у металевій масі. Вуглець і кремній мають графітуючими властивостями. Більшість виливків використовуються чавуни з вмістом вуглецю не більше від 2,7 до 3,6 %. Зі збільшенням вмісту вуглецю зростає рідина плинність чавуну і знижується температура плавлення. При цьому збільшення загального вмісту вуглецю знижує механічну міцність чавуну.

Вміст кремнію у звичайному чавуні становить трохи більше 2,5 %. До елементів, що гальмують графітизацію, відносяться марганець та сірка. Збільшення вмісту в чавуні марганцю призводить до підвищення твердості чавуну та погіршення його оброблюваності.

Підвищення вмісту сірки збільшує усадку чавуну, знижується його рідина, підвищується крихкість. Вміст сірки зазвичай знаходиться в межах 0,1-0,12%.

Фосфор, як і сірка, знижує розчинність вуглецю в розплаві чавуну. Підвищення вмісту фосфору збільшує рідину плинність чавуну і збільшує його крихкість. Вміст фосфору не доцільно перевищувати 0,25%. Ця вимога не дотримується для художнього лиття та в тонкостінних виливках для предметів народного споживання. Ці види лиття припускають підвищення рідини, при цьому вміст фосфору збільшується до 1,0-1,5%.

Кремній, за певних меж змісту, сприяє графітації. При концентрації до 2,5% кремній повністю розчиняється у рідкому залозі, самостійної фази не утворює та виконує роль графітатора. У чавуні при вмісті до 2,5% кремній розчиняється в аустеніті та цементиті. Кремній

витісняє вуглець із розчину у вигляді стигли і загальний вміст вуглецю зі збільшенням вмісту кремнію зменшується.

При вмісті в чавуні понад 2,5% кремній утворює яскраво виражену карбідну фазу. При подальшому збільшенні концентрації кремній гальмує процес графітизації та сприяє відбілюванню чавуну. При вмісті чавуні 18% кремній поєднується із залізом і утворює силіцид FeSi, який виділяється з розчину α -заліза у вигляді евтектики FeSi - α -залізо.

Марганець і сірка перешкоджають графітизації і протилежні вуглецю і кремнію. Марганець у сплаві сприяє підвищенню вмісту вуглецю. У сірому чавуні зі збільшенням вмісту марганцю на 1% вміст вуглецю збільшується на 0,2%.

Сірка витісняє вуглець. Збільшення вмісту сірки на 0,1% вміст вуглецю зменшується на 0,05%. Збільшення вмісту сірки в чавуні на 0,01% компенсується збільшенням вмісту кремнію на 0,1%. Сірка взаємодіє із залізом та іншими хімічними елементами з утворенням шкідливих сульфідів FeS та Al_2O_3 і менш шкідливих сульфідів MnS, Cu_2S тощо.

Сульфід заліза перешкоджає видаленню газів з рідкого чавуну, при цьому виливки стають неоднорідними та негерметичними. Сірка значно знижує рідкість білого і сірого чавунів.

Вплив сірки може знижуватися зі збільшенням вмісту сірого чавуну марганцю. Зі збільшенням вмісту марганцю сульфід FeS перетворюється на складніший подвійний сульфід $mFeS \cdot nMnS$, який має більш високу температуру плавлення. Тугоплавкі подвійні сульфідні утворюють у чавуні самостійну кристалічну фазу у вигляді включень сірого кольору.

Марганець при вмісті його до 0,4% витрачається головним чином освіту сульфіду марганцю. Допустиме вміст марганцю в ковкому чавуні має

перевищувати 0,5—0,6%, а сірому чавуні— 1,0%. Поршневі кільця для авіадвигунів можуть містити марганцю до 1,5%. У великогабаритному чавунному лиття вміст марганцю понад 1,2% призводить до утворення тріщин. При вмісті марганцю в сірому чавуні до 1% є корисною домішкою, він блокує шкідливу дію сірки та подрібнює графіт та перліт.

Фосфор знижує температуру кристалізації чавуну. У масивних виливках фосфор призводить до утворення зональної ліквідації. Нікель та мідь посилюють процес графітизації чавуну. Магній відомий як елемент, що сприяє отриманню високоміцного чавуну з кулястою формою графіту. Кальцій у металі з кремнієм застосовується як відмінний модифікатор; прискорює процес графітизації чавуну при кристалізації. Літій додається в чавун підвищення щільності металу виливків і зниження газової пористості.

2.2 Види та технології лиття чавуну

Виливки з високоміцного чавуну виготовляються в піщаних формах, литтям у кокіль або відцентровим литтям. Виливки як тіл обертання, такі як труби, гільзи, втулки та інших, виготовляються переважно відцентровим литтям.

Високоміцний чавун має в процесі затвердіння велику термохімічну усадку, в цьому випадку необхідно створювати умови для спрямованої кристалізації виливків і використовувати прибутки, які дозволяють уникнути процесу утворення усадкових раковин і пористості в масивних виливках.

При швидкостях охолодження виливків у кокільних формах вище 5,5°C/сек навіть при вмісті понад 0,10% рідкісноземельних металів у структурі з'являється помітна кількість карбідної евтектики, яка пригнічує

кристалізацію графіту. Чавуни з вмістом понад 0,10% рідкісноземельних металів мають структуру білого чавуну з різною дисперсністю фаз. Зі збільшенням вмісту рідкісноземельних металів у структурі високоміцних чавунів зменшується кількість ледебуриту та зростає загальний вміст карбідів. При вмісті 0,234% мас. рідкоземельних металів та охолодженні чавуну в кокільній формі кристалізація ледебуриту повністю пригнічується та формується аномальна евтектика, що складається із збільшених блоків кристалів евтектичних фаз.

Особливість отримання виливків з ковкого чавуну ґрунтується на зниженій рідині білого чавуну з якого він виготовляється. Термічна усадка білого чавуну значно більша за усадку сірого, тому у виливках з білого чавуну утворюється більше усадкових раковин, пористості та тріщин. Процес виготовлення виливків з ковкого чавуну тривалий і енергоємний, собівартість таких виливків значно вища. В результаті тільки до 5% чавунних виливків виробляють із цього ковкого чавуну. У більшості випадків отримання виливків із високоміцних чавунів є доцільнішим.

Для вдосконалення мікроструктури металевої фази чавуну після його модифікування рекомендується вводити в розплав чавуну кускової феросиліцій ФС75 у межах 0,3-1,0% від маси розплаву.

Металоструктурні дані показують, що оптимальною кількістю комплексного модифікатора з вмістом не менше 40,6% рідкісноземельних металів є 1,5-2,0%, що відповідає засвоюваності 0,25-0,30% рідкісноземельних металів.

Сірий чавун при виливку кокіль містить цементиту в межах 25,3÷27,2%. У вибілених чавунах вміст цементиту збільшується в межах від 29,0% до 31,4%, причому вільний графіту відсутній.

Структура виливків з вибілених чавунів, відлитої у піщано-глинисті форми, містить цементиту в межах від 27,7% до 30%. Застосування комплексного модифікатора, що містить у своєму складі 41% кремнію та 4,8% алюмінію, не дозволяє встановити ступінь впливу рідкісноземельних металів на структурооборозування та властивості чавунів у великогабаритних виливках.

Для оцінки впливу рідкісноземельних металів на формування мікроструктури, кількості та форми графіту в чавунах проведено модифікування доєвтектичного чавуну, хімічний склад якого представлений у табл. 2.1

Таблиця 2.1 Хімічний склад доєвтектичного чавуну

Хімічний елемент	C	Si	Vn	P	S
Зміст, % мас. % масс.	3,23.- .2,44	2,66 - ..2,90	0,66 - .0,83	0,041 - 0,057	0,032..- .0,034

Чавун модифікувався окремими присадками рідкісноземельних металів. У складі присадок вводилися Ce і La. Кількість введених рідкісноземельних металів змінювалося в межах від 0,1 до 1,0%.

Такий шлях дозволив вимкнути вплив інших елементів комплексного модифікатора. У таблиці 2.2 представлені результати впливу вмісту рідкісноземельних металів на структуру великогабаритних виливків.

З даних табл. 2.2 слід, що з підвищенням вмісту рідкісноземельних металів збільшується компактність графітних включень. При вмісті 0,064-0,105% рідкісноземельних металів графіт стає вермікулярним. Компактний та вермікулярний графіт виходить при вмісті рідкісноземельних металів у межах 0,122-0,315%. Зростання вмісту рідкісноземельних металів вище

0,35% призводить до погіршення форми графіту і при вмісті 0,405% рідкісноземельних металів виділяється тонкорозподілений міждендритний графіт.

Збільшення швидкості охолодження сприяє отриманню компактного вермікулярного графіту навіть за менших концентрацій рідкісноземельних металів. При підвищених швидкостях охолодження виливків у кокільних формах, понад 5,5°C/сек, вже за вмістом понад 0,10% рідкоземельних металів у структурі з'являється помітна кількість карбідної евтектики, що повністю пригнічує кристалізацію графіту. Чавуни, у яких вмістом понад 0,10% рідкісноземельних металів, мають структуру білого чавуну з досить великим розкидом розмірів фаз. Зі збільшенням вмісту

Таблиця 2.2 Вплив рідкісноземельних металів на структуру великобаритних виливків

Тип форми	Скорость охладения, °C/с	Содержание РЗМ	Феррит, %	Карбид, %	Графит, %	Форма включений графита
Песчано-глинистая	1,9	0,0475	57,7	-	7,9	пластинчатый
		0,064	65,6	-	7,4	вермикулярны
		0,105	57,8	0,3	5,7	вермикулярный
		0,122	35,5	0,3	9,11	компактный вермикуляр
		0,234	13,3	18,7	2,0	компактный
		0,315	11,0	24,5	3,1	компактный
		0,405	5,1	-	5,5	тонкораспределенный
Кокильная	5,5	0,0475	30,4	-	6,5	розеточный
		0,064	34,8	25,7	1,3	компактный
		0,105	1,3	31,3	0,10	компактный
		0,122	1,4	33,0	0,10	компактный
		0,234	2,6	32,4	0,40	компактный
		0,315	0,9	30,6	0,10	компактный
		0,405	1,1	30,7	0,60	компактний

рідкісноземельних металів у структурі чавуну зменшується кількість ледебуриту та зростає загальний вміст карбідів. При вмісті рідкоземельних

металів у межах 0,234% та зі швидкістю охолодження чавуну в кокільній формі кристалізація ледебуриту повністю припинялася та формувалася евтектика, що складається з грубого змішування кристалів евтектичних фаз.

З вищевикладеного випливає, що вплив рідкісноземельних металів на форму включень графіту менш ефективний у порівнянні з магнієм. При всіх швидкостях охолодження в межах від 1,9 до 5,5 ° C/c не вдається створити по всьому перерізу великогабаритних виливків графіт кулястої форми. При малих вмістах рідкісноземельних металів у межах 0,06-0,10% утворюється графіт вермікулярної форми. Графіт компактної форми утворюється при вмісті 0,20% ... 0,35% рідкісноземельних металів.

2.3 Особливості лиття за моделями, що виплавляються.

Лиття по моделях, що виплавляються, є процесом отримання виливків з розплаву металів у формах, робоча поверхня яких формується шляхом вилучення легкоплавкого матеріалу моделі методом розплавлення.

Виплавлювані моделі відливають у прес-формах 1 (рис. 6.а) із низькотемпературних матеріалів на основі парафіну, воску, стеарину, жирних кислот. Після затвердіння матеріалу моделі прес-форма розкривається та модель 2 (рис. 2.1.б) поміщається у холодну воду.

Усі вузли моделі збираються методами припаювання або приклеювання в модельні блоки 3 (рис. 2.1.в) із спільною літниковою системою.

Форми виготовляють багаторазовим пошаровим нарощуванням вогнетривкої суміші 5 на основі рідкого сполучного та кварцового піску. Після чого модельні блоки сушать або на повітрі або серед активних газів.

Після видалення моделі тонкостінні ливарні форми встановлюються в опоку, засипаються кварцовим піском і прожарюються протягом 6-8 годин при температурі 850 –т950 оС (рис. 2.1 д).

Заливку розплаву сплавів у нагріту форму проводять відразу після прокалювання. Заливка може бути реалізована будь-яким відомим способом.

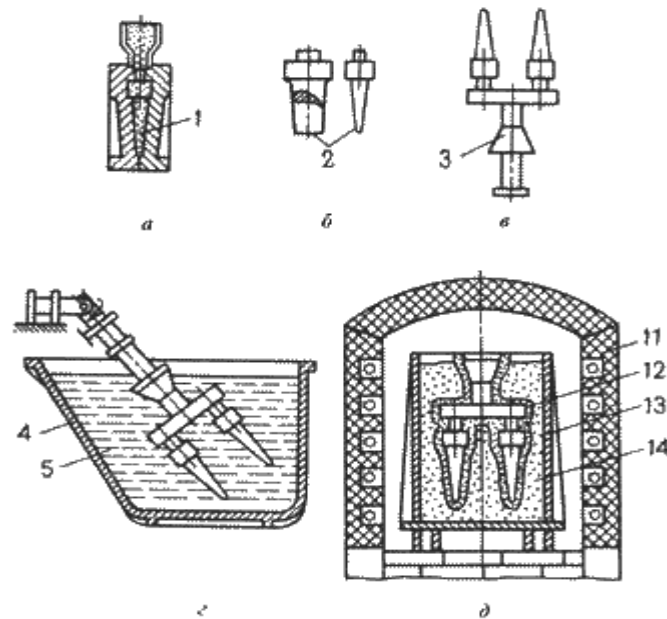


Рисунок 2.1. Технологічні операції процесу лиття за моделями, що виплавляються.

Після кристалізації розплаву металу та охолодження виливків форма руйнується, виливки спрямовуються на механічну обробку, хімічну очистку, промиваються та піддаються термічній обробці.

Лиття по моделях, що виплавляються, дозволяє одержувати складних виливків з різних сплавів масою 0,02...15 кг з товщиною стінки 0,5...5 мм.

Недоліком є складність і тривалість процесу виробництва виливків, застосування спеціальної дорогої оснастки.

Литтям по моделях, що виплавляються, виготовляють деталі для приладобудівної, авіаційної та іншої галузевої промисловості. Використовують при лиття жароміцних сплавів (лопатки турбін), корозійно-стійких сталей, вуглецевих сталей у масовому виробництві (автомобільна промисловість).

3 Технологічні методи підвищення характеристик чавуну

3.1 Удосконалення складу та властивостей переділового чавунку

3.1.1 Особливості модифікування розподільного чавунку

Простим та дешевим способом управління структурою ливарних чавунних сплавів є модифікування. Найбільш актуальне модифікування сірого чавуну, яке дозволяє практично усунути в тонкостінних виливках відбіл, уплунити оброблюваність виливків і зняти процес проведення додаткової термічної обробки для розкладання цементиту в вибілених частинах виливки.

Досить часто використовуються графітуючі добавки на основі кремнію, що додатково містять барій, стронцій, кальцій та рідкісноземельні метали. Механізм дії графітуючих добавок пов'язаний з локальними перенасиченнями в розплаві чавуну при розчиненні кремнію, а також з появою в розплаві чавуну неметалевих включень у вигляді сульфідів, оксидів, нітридів та карбідів [8].

При лиття чавунних виливків також використовуються поверхнево-активні елементи, які затримують зростання центрів кристалізації при охолодженні розплаву. Як поверхнево-активні елементи використовуються Те, Ві, Sb та ін, які збільшують переохолодження розплаву і стимулюють появу нових зародків. На рис. 3.1 Наведена залежність зростання кількості центрів кристалізації залежно від часу процесу при введенні Се та Ві.

У сірому чавуні модифікування поверхнево-активними добавками може підвищити можливість появи відбілу, який пов'язаний зі зниженням температури розплаву чавуну нижче за температуру утворення ледебуриту. При введенні комплексного модифікатора на основі хімічно-активних та поверхнево-активних речовин спостерігається два процеси.

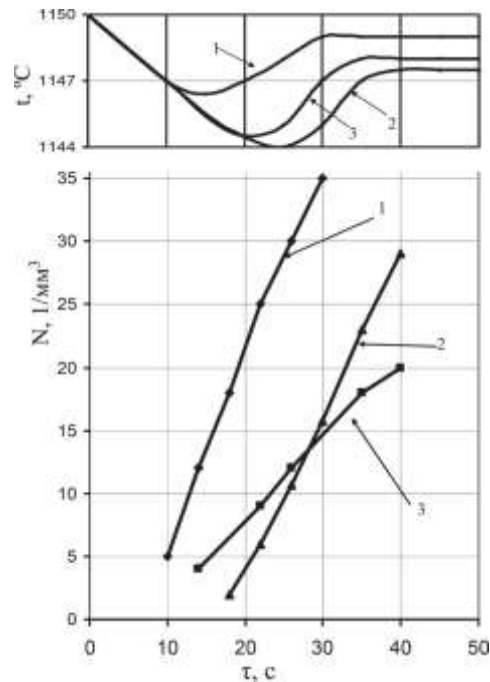


Рисунок 3.1 Залежність зростання кількості центрів кристалізації залежно від часу процесу під час введення Се і Ві. 1 - добавка 0,1% Се; 2 - добавка 0,002% Ві; 3 – вихідний чавун

В одному процесі хімічно-активні та поверхнево-активні речовини зменшують переохолодження, збільшуючи число центрів, а в іншому процесі поверхнево-активні речовини уповільнюють їх зростання, збільшують переохолодження, викликають утворення нових зародків. Через війну таке модифікування стає ефективнішим [9].

На верхньому графіку рис. 3.1 показані криві зміни температури на початкових стадіях кристалізації. Добавка церію знизил переохолодження з 1150 оС до 1145 оС і збільшила кількість центрів кристалізації до 35 $1/\text{mm}^3$ (крива 1). Вісмут знизив переохолодження з 1150оС до 1144 оС і збільшив число центрів кристалізації до 28 $1/\text{mm}^3$, затримав початок процесу кристалізації, сприяв збільшенню числа центрів кристалізації до 28 $1/\text{mm}^3$

(крива 2). Отримані результати показали значно кращі характеристики виливків порівняно з вихідним чавуном (крива 3).

Однако при превышении оптимального количества добавки поверхностно-активного вещества могут привести к повышению отбела путем увеличения переохлаждения и смещения в температурную зону образования цементита.

Комплексное модифицирование химически- и поверхностно-активными веществами более эффективно для снижения отбела в отливках из серого чугуна. Более эффективно применять такое модифицирование для чугунов с высоким углеродным эквивалентом для отливок со сравнительно толстыми стенками.

3.1.2 Одержання виливків з чавуну на основі сфероїдизуючих та модифікуючих компонентів

Для відливання заготовок з високоміцного чавуну необхідно провести попередню підготовку шляхом зниження кількості неметалевих включень та розчинених газів розплаву сплаву.

Як вихідні матеріали необхідно застосовувати допрацьовані передні чавуни. При цьому основну увагу необхідно приділити початковому вмісту сірки та фосфору.

У процесі плавки та розливання при взаємодії рідкого чавуну з повітрям відбувається вторинне окиснення розплаву. Підвищена схильність чавуну з кулястим графітом до поверхневого окиснення, обумовлює утворення оксидних полон, які руйнуються при заливці та утворюють у виливках неметалеві включення.

Примесные елементи Bi, Pb, Sb, Sn, As, Ti пригальмовують процес сфероїзації графіту. Наявність таких демодифікаторів у розплаві чавуну сфероїдизуюча дія магія знижується або може повністю зникнути. Для усунення шкідливого впливу демодифікаторів у розплав вводять комплексні модифікатори із вмістом рідкісноземельних елементів.

В цьому випадку необхідно приділити увагу збільшенню тривалості ефекту сфероїдизує модифікування розплав.

Введення графітізуючих модифікаторів на основі феросиліцію в розплав чавуну утворюються мікроосвіти з високою концентрацією кремнію. Це призводить до зменшення розчинності в цих зонах вуглецю, при цьому виділяється надлишковий вуглець.

Мікрогрупування протягом певного часу стають термодинамічно нестійкими. Цей процес визначає термочасовий характер модифікуючого ефекту.

На тривалість у розплаві сфероїдизуючого ефекту впливає залишковий вміст магнію, коли при його вмісті 0,03-0,07% тривалість не перевищує 10-15 хвилин, після цього ефект сфероїдизації слабшає. Швидкість випаровування магнію з розплав со-
ставить 0,003-0,004 мас. % /хв, з підвищенням температури до 1450 ° С втрати магнію зростають практично вдвічі.

Збільшення тривалості дії сфероїдизуючого ефекту досягається методом підвищення витрати сфероїдизуючих елементів. У цьому випадку підвищується здатність до утворення вільних карбідів і зниження ефективності модифікуючого впливу обумовлюється зародженням центрів кристалізації.

Кількість включень кулястого графіту та збільшення тривалості дії модифікаторів визначається наявністю церію.

Але навіть незначний надлишок церію сильно підвищує відбіль чавуну. Оптимальний залишковий вміст церію після модифікування повинен перебувати в межах 0,004-0,008 мас. %.

Для покращення форми графіту температура розплаву перед розливом повинна бути зниженою з метою підвищення стійкості активних центрів кристалізації та меншою інтенсивністю видалення магнію. У зв'язку з цим зростає тривалість модифікуючого ефекту.

Як сфероїдизуючі модифікатори досить часто використовуються лігатури ФСМг5 і ФСМг5LA4, які містять 5,2% Mg, 0,56% Ca, 1,11% Al, 1,24% La, 45,9% Si. Для графітуючого модифікування застосовуються модифікатори типу ФС65Ba4 у кількості 0,2%. Сфероїдизуючі модифікатори вводяться в розплав чавуну при температурі 1420° С. При сфероїдизуючому модифікуванні вміст вуглецю знижується на 0,15%, при цьому максимальне вміст кремнію не повинен перевищувати 2,6-2,8%.

У разі збільшення вмісту кремнію вище 2,8% можливе утворення силікокарбидів, які значно знижують пластичні властивості чавуну. Оптимальна кількість модифікатора, яка забезпечує отримання чавуну з повністю кулястою формою графіту, знаходиться в межах від 1,2 до 2% від маси розплаву. Точне значення залежить від типу домішок та технології плавки чавуну та визначається експериментальним шляхом.

За розглянутою технологією отримані товстостінні виливки методом вертикального розливання чавуну. Аналіз мікроструктури виливків показав наявність неоднорідності розмірів графітових включень товщиною стінки виливки. Від поверхневих шарів до центру заготівлі розміри графітових включень збільшуються від 25мкм до 45мкм, розподіл включень графіту рівномірний, вміст фериту у структурі чавуну не більше 2 – 10 %. При середній твердості 181 НВ відносне подовження чавуну становило 10-12%.

З метою отримання високоміцного чавуну з чисто феритною структурою та високими показниками за пластичністю, перед модифікуванням необхідно знизити вміст сірки та кисню в розплаві та використовувати чавуни з мінімальним вмістом марганцю та фосфору.

Для отримання заготовок із міцністю до 600 МПа необхідно збільшити вміст марганцю до 0,5-0,6 % та провести легування чавуну.

в межах 0,2-0,5% Ni, Cu, Mo, Cr з різними поєднаннями.

Для отримання високих міцності показників чавуну в литому стані можливе використання оптимального варіанту ізотермічного гарту.

Збільшення вмісту легуючих елементів не впливає на фізико-механічні властивості чавуну.

— Одержання чавуну з вермікулярною формою графіту (ЧВГ)

можливо такими способами:

- неповна обробка розплаву чавуну магнієм;
- обробка чистого по сірці передільного чавуну рідкоземельними металами;
- обробка розплаву чавуну сплавами, які містять як глобуляризатори – Mg, Ce, і деглобуляризатори - Ti, Al.

Спосіб неповної обробки розплавленого чавуну магнієм або сплавами на його основі досягається тільки у вузькому інтервалі вмісту залишкового магнію від 0,013 до 0,018%. Кількість використаної магнієвої лігатури має бути в точній відповідності до вихідного вмісту сірки. Використання надмірної кількості магнієвої лігатури веде до утворення кулястого графіту, зниження вмісту феритної фази, утворення вільного цементиту в приповерхневих шарах заготовок.

Введення оптимальної кількості модифікатора призводить до стрибкоподібного підвищення міцності та відносного подовження.

Структуру чавуну з вермікулярним графітом можна одержувати з допомогою модифікаторів з урахуванням рідкісноземельних металів. Відомі модифікатори на основі лантаноїдів, що забезпечують високі функціональні властивості чавуну.

Тривалість дії модифікаторів на базі рідкісноземельних металів дещо довша, ніж при обробці магнійсодержащими лігатурами. Наявність у розплаві залишкового вмісту вільних рідкісноземельних металів у кількості до 0,02%

достатньо для стабільного отримання чавуну з вермікулярною формою графіту.

У разі виникнення великого проміжку часу між процесом модифікування та розливу розплаву відновлення ефекту модифікування можливе шляхом вторинного додавання модифікатора у досить малій кількості. Повернення чавуну з вермікулярною формою графіту, отриманого обробкою рідкісноземельними металами можна використовувати для отримання високоміцного чавуну, а для отримання чавуну з вермікулярною формою графіту застосовувати повернення високоміцного чавуну.

Підвищений вміст титану негативно позначається на формі графіту. Фізико-механічні властивості чавуну значно знижуються внаслідок утворення включень графіту аномальної форми. Високий вміст сірки та надмірне модифікування чавуну поряд з вермікулярним графітом може з'являтися графіт псевдоевтектичного типу. Утворення графіту пластмасової форми пов'язується з підвищеним вмістом кремнію більше 2,5% або з ефектом перемодифікування.

Фірма Elkem пропонує для отримання заготовок із чавуну з Вермікулярною формою графіту є модифікатор CompactMag™, що містить Si 44-48%, Mg 5-6%, Ca 1,8-2,3%, PЗМ 5,5-6,5%, Al до 1,0%. В залежно від початкової кількості сірки рекомендується введення модифікатора у кількості 0,3-0,4%. Оптимальний склад вихідного чавуну повинен містити вуглецю – 3,7-3,9%, кремнію – 1,5-2,0%, фосфору до 0,03%, сірки в межах 0,07-0,017%.

Засвоєння з модифікатора магнію не більше 50-70%, церію - 80-90%. Як графітізуючі модифікатори рекомендується використовувати феросиліцій з барієм, стронцієм, церієм.

Основні вимоги до хімічного складу для отримання чугуна з вермікулярною формою графіту аналогічні вимогам для чавуну з кулястим

графітом. Проте, проведення обробки лігатурами повинно проводитися значно точніше, ніж при виробництві високоміцного чавуну.

Найбільший вплив на механічні властивості чавуну з вермікулярною формою графіту в литому стані надають вуглець, кремній та марганець. Збільшення вмісту фосфору більше 0,04% знижують ударну в'язкість та відносне подовження чавуну з вермікулярною формою графіту.

Вплив кремнію і фосфору на пластичні властивості чавуну з вермікулярною формою графіту виявляються більшою мірою, ніж на межу міцності та твердості. При вмісті сірки у вихідному розплаві до 0,02% для стабільного отримання чавуну з вермікулярною формою графіту необхідно запровадження 0,6% модифікатора. При утриманні сірки до 0,01% стійке отримання вермікулярної форми графіту утворюється при 0,4 – 0,6% модифікуючої добавки. Необхідно дуже точно дотримуватися хімічного складу вихідного металу, температури заливки і дозування модифікатора.

Найбільш ефективною температурою модифікування чавуну феросиліцієм є 1360 0С. Перегрів чавуну призводить до розчинення графіту та до дезактивації потенційних зародків, відбувається подрібнення включень вільного графіту та зростання кількості междендритного графіту за одночасного збільшення кількості дендритів аустеніту.

Крім температурно-часового фактора на ефект дії присадок істотно впливає швидкість охолодження виливки. Збільшення швидкості охолодження призводить до збільшення переохолодження розплаву, подрібнення графітових включень до утворення точкового графіту та різкого підвищення схильності чавуну до відбілу.

Запобігання появі відбілу та междендритного графіту, а також підвищення механічних властивостей сірого чавуну забезпечується застосуванням графітизуючих присадок. Вплив присадок на структуру чавуну значною мірою визначається температурою їхнього введення.

Домішки, що вводяться, утворюють в рідкому чавуні тугоплавкі сполуки, які активізуються присутніми в розплаві графітними комплексами.

Причому повнота та характер перебігу цих процесів залежить від температурних умов і типу присадки, що вводиться.

Механізм графітізуючого модифікування чавуну полягає у впливі на зародження та зростання кристалів і на кристалізацію графіту при евтектичній температурі. Ефект модифікування визначається кількістю активних додаткових

центрів кристалізації. Елементи, що входять до складу графітізуючих модифікаторів, взаємодіючи з сіркою та газами, пов'язують їх у хімічні сполуки, усуваючи тим самим їх карбідостабілізуючу дію. У процесі графітізації відбувається дифузія вуглецю в розплав і кристалізація вуглецю як графіту наявних зародках. Як кристалічні зародки можуть виступати оксиди, сульфід, нітриди, карбіди і т.д., що мають структурну і розмірну відповідність кристалічних решіток відповідного металу або фази, що випадає.

Критеріями ступеня ефективності графітізуючих модифікаторів є зменшення схильності чавуну до відбілу, зниження величини переохолодження при евтектичній кристалізації,

подрібнення та покращення форми евтектичних зерен, тривалість дії модифікуючого ефекту.

Основна мета графітізуючого модифікування полягає в стимулюванні виділення вуглецевмісних фаз, підвищенні стійкості активних центрів кристалізації.

Висока ефективність дії модифікаторів на основі кремнію, обумовлена виникненням локальних хімічних та теплових неоднорідностей при розчиненні модифікатора в розплаві. У зонах з високою концентрацією кремнію розчинність вуглецю зменшується, в результаті виділяється

надлишковий вуглець, що утворює мікрогрупування, які можуть бути потенційними зародками графіту при кристалізації.

З часом угруповання стають термодинамічно нестійкими, відбувається дезактивація потенційних зародків кристалізації графітових включень, що визначає термочасовий характер модифікуючого ефекту.

При виробництві тонкостінних чавунних виливків, до складу комплексних на основі феросиліцію, вводять стронцій, що володіє практично однаковою з кальцієм активністю по відношенню до кисню та сірки. Для отримання однакової модифікуючої дії витрата стронцієвого модифікатора, у порівнянні з витратою феросиліцію ФС75, залежно від хімічного складу чавуну, зменшується в 1,5-2,0 рази.

3.2 Модифікація нанорозмірними частинками карбідів

В даний час великий інтерес набуває використання наноматеріалів у металургії для покращення якості виробів. Нанорозмірні тугоплавкі частинки, які застосовуються як модифікатори, можуть служити центрами зародка освіти в процесі кристалізації і блокувати дифузію атомів до кристалів, що зароджуються і зростають, уповільнюючи їх зростання [11-15]. Експериментально доведено вплив збільшення кількості зародків в одиниці об'єму розплаву на подрібнення кристалів та підвищення механічних характеристик металу [16, 17]. І тут у сплавах необхідно збільшити кількість зародків кристалізації.

Обробка у високоенергетичних активаторах планетарного типу дозволяє активувати частинки нанопорошків, а додаткове плакування часток дозволяє отримувати модифікатори, що добре змочуються розплавами.

Незважаючи на велику кількість різних модифікаторів питання отримання модифікаторів на основі тугоплавких нанодисперсних частинок є актуальними.

Нанодисперсні порошки карбідів вольфраму та титану складу WC:TiC = 70:30 найкраще виходять методом СВС із наступною механічною активацією [18].

Керамічні матеріали на основі карбідів слабо змочуються розплавами чавуну. З метою підвищення змочування розплавами чавуну порошки додатково обробляються в активаторах з металами-протекторами хромом і міддю.

За викладеною схемою отримані модифікатори складу: (WC, TiC)/Cr/Cu: 50/50/0 (модифікатор M1) та (WC, TiC)/Cr/Cu: 25/25/50 (модифікатор M2). Модифікатори застосовувалися як порошоків з концентрацією керамічної фази в межах 0,01-0,2 %.

Процес модифікування проводився як у формі, так і в ковші. Ливарні форми виготовлялися з формувальних матеріалів на основі піщано-глинистої суміші (ПГС) і холодно-твердіє суміші (ХТС). Процес модифікації проводився при заливанні у фору і в ковші шляхом укладання модифікатора в алюмінієвій фользі. Хімічний склад зразка чавуну без модифікатора представлено табл.3.1.

Таблиця 3.1 Хімічний склад немодифікованого чавуну

Елементи	C	Si	Mn	P	S	Ti	Cu	W
Масова частка	3,27	1,92	0,68	0,56	0,14	0,09	0,022	0,017

Процес модифікування, склад, кількість модифікатора та спосіб введення представлені у табл.3. 2: зразок 1 – контрольний без модифікатора, зразки 2-4 – з модифікатором М2, зразок 5 – з модифікатором М1.

Таблиця 3.2 Параметри процесу модифікації

Номер	Назва	Склад, (WC,TiC)/Cr/Cu, %	Концентрація керамічної фази	Спосіб введення
1	-	-	-	-
2	М2	25/25/50	0,33	Форма
3	М2	25/25/50	0,013	Форма
4	М2	25/25/50	0,034	Ківш
5	М1	50/50/00	0,062	Ківш

Основні властивості зразків модифікованого чавуну зразка наведено у табл.3. 3.

Таблиця 3.3 Основні функціональні властивості зразків чавуну

Номер	Межа міцності, МПа	Твердість, одиниць НВW	Зміна міцності, %	Зміна твердості, %	Зміна відносної корозійної стійкості
1	178	177	0	0	0
2	211	166	18,5	6,6	13,7
3	209	197	17,4	11,3	7,2
4	190	182	6,72	2,8	4,1
5	180	194	1,1	9,6	7,6

Збільшення межі міцності становило від 1,1 до 18,5%, збільшення твердості за Брінеллем становило від 2,8 до 11,3. Корозійна стійкість зросла

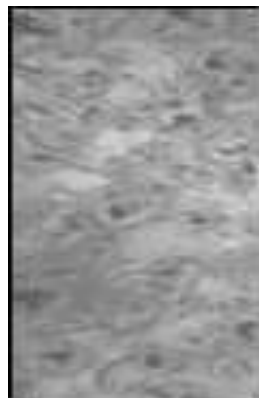
від 7,2 до 44,1%. Максимальні значення корозійної стійкості в межах 37,6 та 44,1 % отримані при модифікуванні в ковші.

На рис. 3.2-3.4 представлена мікроструктура немодифікованих та модифікованих зразків чавуну.



X 400

Рисунок 3.2 Мікроструктура немодифікованого чавуну



а) x400



б) x400

Рисунок 3.3 Мікроструктура чавуну модифікованого у формі
а) WC, TiC - 0,033%; б) WC, TiC - 0,033%

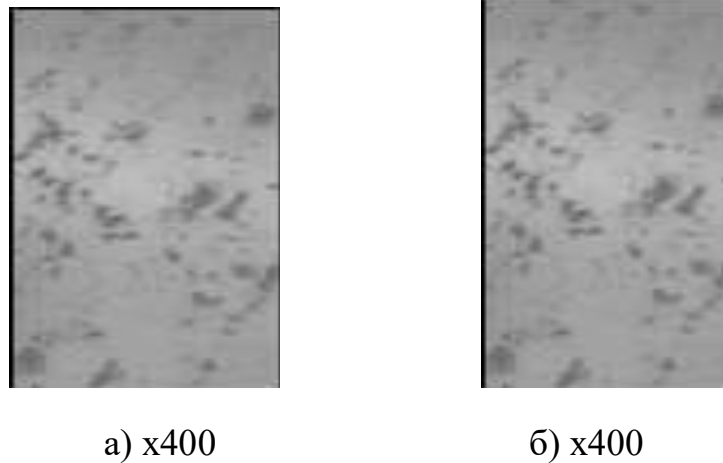


Рисунок 3.4 Мікроструктура чавуну модифікованого в ковші

а) WC, TiC - 0,033%; б) WC, TiC - 0,062%.

У модифікованих зразків чавуну (рис.3.2, 3.3) спостерігається подрібнення графітових включень проти контрольним зразком (рис. 3.1). Зразки, модифіковані у формі (рис.3.2, зразки 2 і 3) і ковші (рис.3.3, зразки 4 і 5), відрізняються як розподілом, так і формою графітових включень.

3.3 Удосконалення структури та властивості модифікованого переділового чавуну

3.3.1 Загальні характеристики вихідних великогабаритних виливків

Макроструктура оцінювалася за зрізом зразків у площині зовнішня поверхня зовнішньої до внутрішньої – внутрішня поверхня виливка. По зовнішній поверхні сформувався вибілений шар товщиною 6,9 ... 7,0 мм, по внутрішній поверхні вибілений шар становить 2 мм. На поверхні від зовнішньої до внутрішньої сторони вибілений шар становить 12...16мм.

Мікроструктури зразків чавуну по різних зонах виливки досліджувалися мікрошліфами на оптичному мікроскопі МІМ 7, з приставкою цифрової камери МС-35 з прямим виходом на комп'ютер.

На рис.3. представлена мікроструктура зразка протруєного 5% розчин азотної кислоти в етиловому спирті.

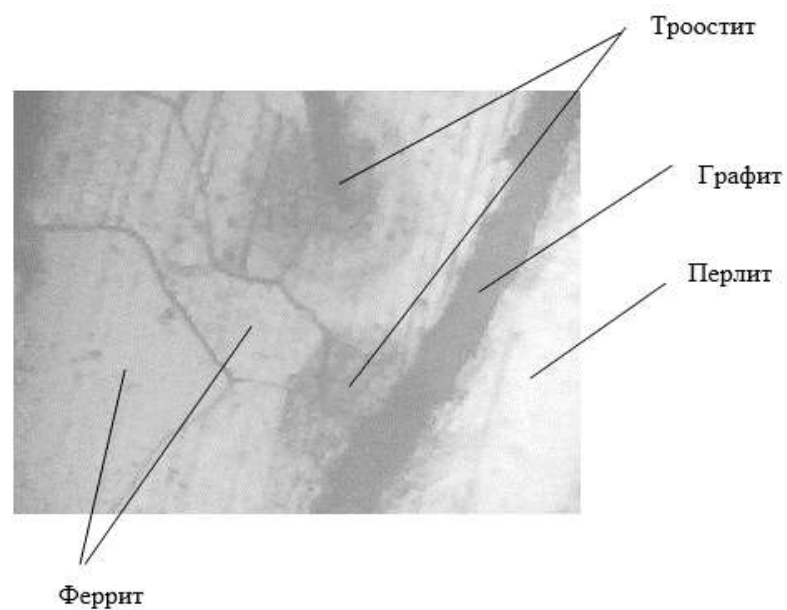


Рисунок 3.5 – Верхня частина заготовки, X500

Структура верхньої частини лтлівки представлена рисунку 3.5. При малої швидкості переохолодження утворюються ферито-перлітні структури. Феррит розташовується у вигляді окремих добре окреслених зерен. Перлітна структура розташована біля графіту.

Графіт у верхній частині виливниці має розширену пластинчасту, частково завихрену форму (рис. 2), а також частина графіту має вермікулярну структуру.



Рисунок 3.6 Структура графіту у верхній частині виливниці

Через різну швидкість охолодження верхньої та середньої частин виливки розрізняються і структури. Середня частина заготовки складається з трооститу та фериту, рис. 3.7.. Структура графіту пластинчаста прямолінійна.

Для експериментального дослідження міцності чавуну з виливків були виготовлені зразки для випробувань на розтяг з нижньої, середньої та верхньої частин виливки в зонах з внутрішньої та зовнішньої сторін.

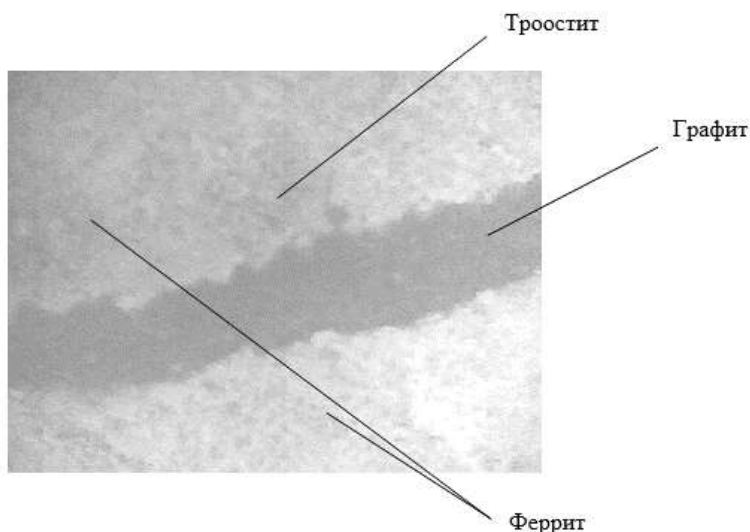


Рисунок 3.7 - Середня частина виливка

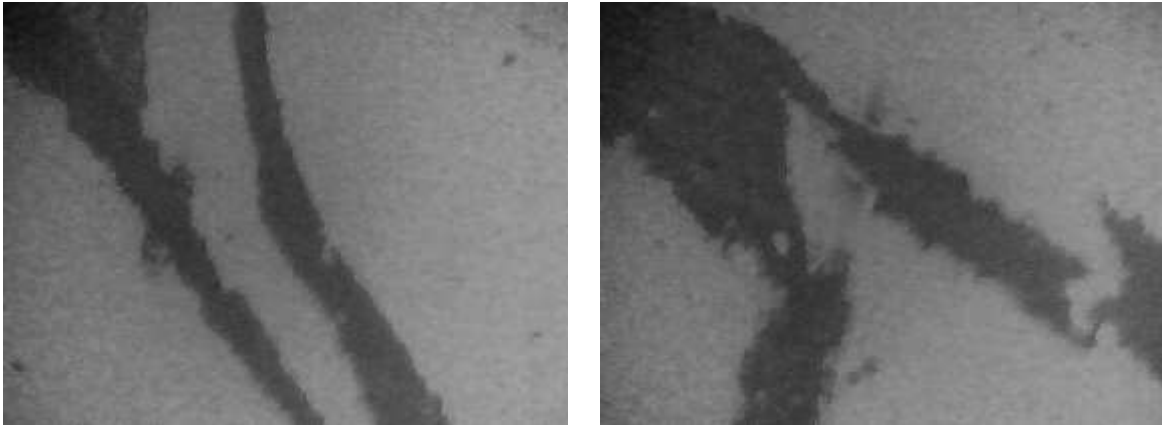


Рисунок 3.8 – Форма включень графіту в середній частині виливки

Зразки відповідали стандартним розмірам із розмірами робочої частини: діаметр – 10 мм, довжина – 60 мм. Випробування проводилися машиною для випробувань Р-10. Дані за експериментальними значеннями міцності представлені в табл.3.4.

Таблиця 3.4 - Розподіл межі міцності на розтяг по зонах виливки

№ п/п	Зона	Місто	Межа міцності,МПа
1	Нижня частина	Зовнішня	107,1
		Внутрішня	93,4
2	Середня частина	Зовнішня	87,2
		Внутрішня	94,4
3	Верхня частина	Зовнішня	92,4
		Внутрішня	87,3

З аналізу даних табл. 3.4 слідує:

- менші значення меж міцності має чавун, відібраний із верхньої частини виливки. Зниження цього параметра підтверджується збільшенням пористості чавуну до 0,732%;

- великі значення характеристик міцності чавуну відповідають для нижньої частини виливки;
- для нижньої, середньої та верхньої зон виливниці межі міцності нижче на внутрішній стороні стінки порівняно із зовнішньою стороною стінки;
- низькі значення показників міцності, які значно менше міцності модифікованих чавунів;
- наявність пористості в обсязі виливниці показує слабе газове рафінування розплаву чавуну.

3.3.2 Структура та властивості виливків із модифікованого переділового чавуну

Доробка переділового чавуну спрямовано зниження вмісту в чавуні вільного вуглецю нижче евтектичного з допомогою утворення нерозчинного карбїду титану – TiC . Для цього він пропонується варіант отримання лігатури з розрахунковою масою на 100 кг: мідний порошок – 18,5 кг; алюмінієвий порошок АП-4 – 18,5 кг; титановий порошок – 63 кг. Лігатура є відпресованим брикетом з порошоків міді, алюмінію і титану. Витрата лігатури – 2,7 % одну тонну розплаву чавуну. Вводиться в розплав при максимальній температурі, при якій розплав надходить з доменного цеху.

Призначення компонентів лігатури: титан утворює карбїд титану та знижує вміст вільного вуглецю на 0,5%, стабілізує одержання вермікулярного графіту; мідь – прискорює процес утворення карбїду титану, витісняє титан із твердого розчину з утворенням TiC та підвищує міцність чавуну; алюміній – прискорює процес плавлення брикету та знижує швидкість утворення карбїду заліза.

Для модифікування чавуну у великогабаритному виливку пропонується лігатура-модифікатор наступного складу з розрахунковою масою 100 кг:

Ферросіліцій ФС75 – 37,7 кг;

Мідь технічна – 28,3 кг;

Магній – 5,7 кг.

Алюміній А85 – 28,3 кг.

Алюміній, магній та мідь можуть бути попередньо сплавлені у попередню лігатуру. Склад попередньої лігатури: мідь технічна – 46,0 %; алюміній – 46,0%; магній – 8,0%.

Виплавка лігатури-модифікатора полягає у сплавленні попередньої лігатури з феросиліцієм ФС 75. Витрата лігатури-модифікатора – 3,5% одну тону розплаву чавуну. Час введення лігатури-модифікатора – за 10 хвилин до розливу чавуну за температури розливу.

Призначення компонентів лігатури-модифікатора: алюміній – збільшує швидкість графітизації, знижує схильність чавуну до відбілу, збільшує термостійкість та підвищує термоциклічну стійкість; мідь – прискорює дифузійні процеси, прискорює графітизацію, загальмовує утворення цементиту, подрібнює графіт та підвищує міцність чавуну; магній – пов'язує сірку, гальмує швидкість утворення пластинчастого графіту, прискорює процес утворення вермікулярного графіту, знижує пористість чавуну у виливку; кремній – прискорює швидкість зростання графіту та розчинення цементиту, збільшує пластичність чавуну.

Проведено виплавку лігатури – модифікатора з шифром МСП 20-21. Хімічний склад лігатури – модифікатора МСП 20-21 представлений у табл.3.5.

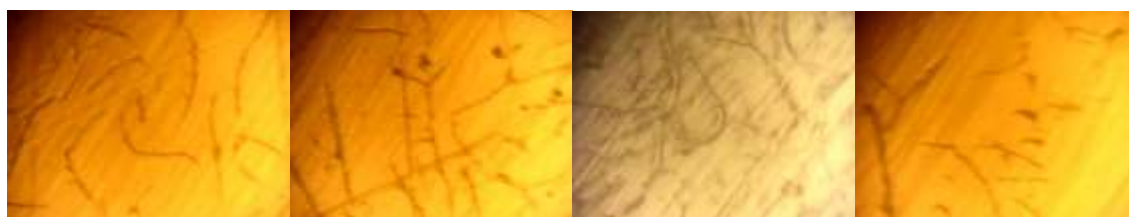
Таблица 3.5 Хімічний склад модифікатора МСП 20-21

Хімічний елемент	Si	Cu	Al	Mg	Mn	Cr	Fe
Зміст, %	34,46	32,87	14,96	2,83	0,19	0,06	14,63

Проведена плавка двох крупногабаритних отливок, модифіцированих лігатурой– модифікатором МСП 20-21. Хімічний склад модифіцированного передельного чугуна в отливке представлен в табл. 3.6.

Таблица 3.6 Хімічний склад модифіцированного передельного чугуна в отливке

Хімічний елемент	C	Si	Mn	Cu	Cr	S	P
Зміст плавка № 1, %	3,9 ±0,2	1,01 ±0,2	0,87 ±0,1	0,21 ±0,02	0,04 ±0,02	0,021 ±0,004	0,016 ±0,004
Зміст, плавка № 2, %	4,1 ±0,2	1,25 ±0,2	0,78 ±0,1	0,22 ±0,02	0,03 ±0,02	0,019 ±0,004	0,015 ±0,004



Таблиця 3.7. Порівняльні характеристики по міцності на розрив виливків з переробного чавуну та модифікованого МСП 20-21

№ п/п	Тип зразка	Межа міцності, МПа	
		min	max
1	На основі вихідного чавуну	87	107
2	На основі модифікатора МСП 20-21	198	218

Експериментальні дані табл.3.7 показують, що характеристики міцності чавуну на основі модифікатора МСП 20-21 (Si-Cu-Mg-Al) вище властивостей передільного чавуну в 2,1 рази.

Загальні висновки

1. У роботі представлений всебічний аналіз структури, функціональних властивостей, способів модифікації та графітизації, способів підготовки та проведення плавок сірого чавуну, білого чавуну, ковкого чавуну та високоміцного чавунку.
2. Розглянуто види та способи застосування різних модифікаторів з метою отримання оливок з пластинчастим, пластівчастим, верміткулярним та кулястим графітами.
3. Викладено методи та варіанти отримання оливок з різною формою графіту та фізико-механічними характеристиками.
4. Представлені варіанти вдосконалення структури та якостей переділового чавунку. Запропоновано хімічний склад технологія отримання лігатури-модифікатора системи кремній,мідь,магній,алюміній. Експериментально показано, що запропонований похід дозволив отримати структуру чавуну оливок з пластинчасто-вермікулярною формою графіту та міцністю до 218 МПа.

Список літератури

1. Скобло Т.С. Прокатные валки из высокоуглеродистых сплавов / Т.С. Скобло, Н.М. Воронцов, С.И. Рудюк. – М. : Металлургия, 1994. – 336 с.
2. Таленберг А.Е. Новые методы сфероидизирующей обработки чугуна за рубежом / А.Е. Таленберг // Литейное производство. – 1984. – № 7. – С. 7-9.
3. Шерман А.Д. Чугун / М. : Металлургия, 1991. – 576 с.
4. Официальный сайт NPP Group [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: www.npp.ru.
5. Elkem [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: www.elkem.com.
6. Модифицирование чугуна для отливок [Электронный ресурс] : [Веб-сайт]. – Электронные данные. – Режим доступа: www.steeltimes.ru/books/blastfurnace/pigironotlivki/24/24.php.
7. Слынько Г.И.*Влияние комплексных модификаторов на структуру серых и отбеленных чугунов/ Вісник приазовського державного технічного університету// Серія: Технічні науки.- 2018р. Вип. 36,стр 69-74
8. Некоторые вопросы теории встречного модифицирования чугуна / А. В. Афонаськин, О. Д. Опалихина, А. А. Жуков // Изв. вузов. Черная металлургия. 1991. № 7. С. 12–13.
9. Комаров О. С. Термокинетические основы кристаллизации чугуна / О. С. Комаров// Мн.: Наука и техника, 1982. 262 с.
10. Способы металлографического травления: Справ. изд.: Пер. с нем. М. Беккерт, Х. Клемм. 2-е изд. М.: Металлургия, 1988. 400 с.
- 11 Крушенко Г.Г., Ямских И.С., Бонченков А.А., Мишин А.С. Повышение качества чугунных отливок с помощью нанопорошков. Металлургия машиностроения, 2002, 2 (9), 20-21.

12. Полубояров В.А., Черепанов А.Н., Коротаева З.А., Ушакова Е.П. Способ внепечного модифицирования чугунов и сталей. Пат. 2344180, Российская Федерация, опубл. 20.01.2009.
13. Затуловский С. С. Суспензионная разливка. Киев: Наукова думка, 1981. 260 с.
14. Лезник И.Д., Беркун А.Ф., Будашева Т.Б., Чебурков Е.М. Способ суспензионной разливки чугунов. Пат. 2142355, Российская Федерация, опубл. 10.12.1999.
15. Полубояров В.А., Коротаева З.А., Жданок А.А., Кузнецов В.А., Степанова Н.В. Внутриформенное модифицирование чугунов. Исследование влияния модификаторов на основе карбида кремния на процессы кристаллизации серого чугуна. СООБЩЕНИЕ 1. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия, 2014, 6, 20-24. [
16. Vladimir A. Poluboyarov, Zoya A. Korotaeva, Alexander A. Zhdanoka and Victor A. Kuznetzov. Nanodisperse Hadfield (110G13L) Steel Modification, Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2016, 9(1), 117-125.
17. Полубояров В.А., Жданок А.А., Коротаева З.А., Кузнецов В.А. Получение WC и W₂C из смеси порошков вольфрама, титана и сажи методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Неорганические материалы, 2014, 50(5), 508-511.
18. Полубояров В.А. Модифицирование серого чугуна составами на основе нанодисперсных порошков карбидов вольфрама и титана / В.А. Полубояров, З.А. Коротаева, А.А. Жданок, Ф.К. Горбунов // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies, 2019, 12(2), 192-202