

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Механіко-технологічний факультет
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»

Зав. кафедрою МЛВ

к.т.н. доцент

_____ Олександр КУЗИК

“ _____ ” _____ 202__ року

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

за другим (магістерським) рівнем
вищої освіти

на тему

**«Дослідження особливостей структурно-фазових перетворень та
формування компактної форми графіту у виливках з
алюмінієвого чавуну»**

**«Investigation of the features of structural and phase transformations
and formation of a compact form of graphite
in aluminium cast iron castings»**

Виконав здобувач вищої освіти:

II курсу, групи ПМ-22М-1

ОПП «Прикладна механіка»

спеціальності 131 Прикладна механіка

_____ Біжан Я.В.

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

“ _____ ” _____ 2023 року

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

Біжан Ярослав Васильович

1. Тема роботи: "Дослідження особливостей структурно-фазових перетворень та формування компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну"

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

Затверджені наказом вищого навчального закладу від "04"серпня 2023 року № 19-13

3. Строк подання роботи до захисту "22" грудня 2023 року _____

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи.

Метою роботи є визначення впливу факторів на формування структури та компактної форми графіту виливків з алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш для досягнення найвищого ступеня сфероїдизації графітних включень.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати склад, структурно-фазові перетворення та властивості високолегованих алюмінієвих жаростійких чавунів.

3. Розробити методику дослідження умов утворення компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну з використанням методу вимірювання активності кисню.

4. Запропонувати принципова схема пристрою для вимірювання активності кисню в розплаві чавуну.

5. Вибрати основні методики дослідження, хімічного складу, структури та властивостей ливарних алюмінієвих чавунів.

6. Дослідити структурно-фазові перетворення при кристалізації високолегованого алюмінієвого чавуну.

7. Провести експериментальні дослідження залежність активності кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 від кількості сфероїдируючого модифікатора (РЗМ), при якій досягається найвищий ступінь сфероїдизації графітних включень.

5. Перелік ілюстративного матеріалу . на 12 слайдах

6. 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	04.12	
4	Графічний матеріал	18.12	

Дата видачі завдання

«4» 09 2023 року

Керівник роботи

Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

« » 2023 року

Ярослав БІЖАН

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційну магістерську роботу виконав здобувач вищої освіти Біжан Ярослав Васильович студент II курсу, групи ПМ-22М-1, ОПП «Прикладна механіка» спеціальності 131 Прикладна механіка на тему "Дослідження особливостей структурно-фазових перетворень та формування компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну", яка складається з пояснювальної записки та ілюстративного матеріалу. Пояснювальна записка містить 61 сторінок тексту, формату А4, 16 рисунків, 21 таблицю. Ілюстративний матеріал містить 12 слайдів.

Кваліфікаційна магістерська робота присвячена Дослідження особливостей структурно-фазових перетворень та формування компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну ЧЮ22.

Показано, що одним із перспективних напрямків широкого застосування високолегованих алюмінієвих чавунів у промисловості є технологічні рекомендації, щодо сфероїдизуючого модифікування та вибору оптимального варіанту лиття, що забезпечують отримання виливків з високими комплексом механічних характеристик.

Досліджено формування структури чавуну ЧЮ22Ш за його кривими охолодження, показано, що чавун переважно кристалізується при постійній температурі, але зазнає незначної доевтектичної та заевтектичної кристалізації. Мікрорентгеноспектральним аналізом фазового складу чавуну ЧЮ22Ш виявлено утворення карбід заліза алюмінію, що близький за складом до $Fe_{1,5}AlC_x$.

Показано, що вимірюючи активність кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22, можна оцінити його стан після сфероїдизуючої модифікації. Встановлено залежність активності кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 від кількості сфероїдизуючого модифікатора (РЗМ) та визначили оптимальні його витрати, при яких досягається найвищий ступінь сфероїдизації графітних включень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: розплав, алюмінієвий чавун, структура, властивості, активність кисню, вилівка, модифікування.

ABSTRACT

The qualifying master's thesis was completed by the student of higher education Bizhan Yaroslav Vasyliovych, II year student, group PM-22M-1, OPP "Applied mechanics" specialty 131 Applied mechanics on the topic " Investigation of the features of structural and phase transformations and formation of a compact form of graphite in aluminium cast iron castings". The explanatory note contains 58 pages of text, A4 format, 13 figures, 7 tables. Illustrative material contains 12 slides.

The qualifying master's thesis is devoted to the study of the peculiarities of structural and phase transformations and the formation of a compact form of graphite in castings from aluminum cast iron.

It is shown that one of the promising areas of wide application of high-alloyed aluminum cast irons in industry are technological recommendations for spheroidizing modification and selection of the optimal casting option, which ensure the production of castings with a high complex of mechanical characteristics.

A methodology for studying the conditions for the formation of a compact form of graphite in aluminum cast iron castings using the method of measuring oxygen activity has been developed, and a schematic diagram of a device for measuring oxygen activity in molten iron has been proposed.

The formation of the structure of cast iron was studied according to its cooling curves, it was shown that the cast iron mainly crystallizes at a constant temperature, but undergoes minor pre-eutectic and post-eutectic crystallization. X-ray microspectral analysis of the phase composition of cast iron revealed the formation of aluminum iron carbides, which are close in composition to $\text{Fe}_{1.5}\text{AlC}_x$.

It is shown that by measuring the activity of oxygen in aluminum cast iron, it is possible to assess its condition after spheroidizing modification. The dependence of oxygen activity in aluminum cast iron on the amount of spheroidizing modifier was established and its optimal consumption was determined, at which the highest degree of spheroidization of graphite inclusions is achieved.

KEY WORDS: melt, aluminum cast iron, structure, properties, oxygen activity, casting, modification.

ЗМІСТ

	стор.
Вступ.....	8
РОЗДІЛ 1 СКЛАД, СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ ЖАРОСТІЙКИХ ЧАВУНІВ.....	10
1.1 Жаростійкі сплави їх класифікація та вимоги.....	10
1.2 Високолегований алюмінієвий чавун як жаростійкий ливарний сплав...	13
1.3 Структура та властивості алюмінієвих чавунів.....	19
1.3.1 Діаграма стану сплавів Fe-Al та Fe-Al-C.....	19
1.3.2 Вплив алюмінію на структуру чавуну.....	21
1.3.3 Ливарні властивості високолегованих алюмінієвих чавунів.....	25
1.3.4 Фізичні властивості високолегованих алюмінієвих чавунів.....	27
1.3.5 Механічні властивості високолегованих алюмінієвих чавунів.....	28
1.4 Особливості технології виробництва виливків із алюмінієвого чавуну...	31
1.4.1 Технологія плавки виливків із алюмінієвого чавуну в індукційній печі.	31
1.4.2 Лиття та обробка алюмінієвого чавуну для отримання графіту кулястої форми.....	33
1.4.3. Застосування високолегованого алюмінієвого чавуну.....	35
Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.....	35
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВОГО ЧАВУНУ.....	37
2.1 Характеристика та плавка алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш.....	37
2.2 Методика дослідження мікротвердість фазових складових.....	39
2.3 Мікрорентгеноспектральний аналіз.....	40
2.4 Визначення активності кисню у алюмінієвому розплаві.....	41
2.5 Термічний аналіз.....	42
2.6 Металографічні дослідження алюмінієвого чавуну.....	42
Висновки до другому розділу.....	43
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ	

ТА ФОРМУВАННЯ КОМПАКТНОЇ ФОРМИ ГРАФІТУ У ВИЛИВКАХ З АЛЮМІНІЄВОГО ЧАВУНУ.....	45
3.1 Формування структури в алюмінієвому чавуні ЧЮ22Ш.....	45
3.2 Особливість формування компактної форми графітних включень у виливках з алюмінієвого чавуну.....	49
3.3 Вплив активності кисню на формування компактної форми графітних включень у виливках з алюмінієвого чавуну.....	51
Висновки до третього розділу.....	58
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	59
Список використаних джерел.....	60

ВСТУП

На сьогодні все більше технічних засобів, машин та механізмів працюють в інтенсивних режимах роботи, до деталей яких ставляться вимоги підвищених робочих параметрів швидкостей, тисків та температур. Відповідно до цього необхідні матеріали з високими функціональними характеристиками. Інтенсивний розвиток техніки показують, що чавун і надалі займатиме переважне значення серед інших матеріалів в машинобудуванні. Доступність, простота та дешевизна виготовлення виливків із чавуну, та різноманітність його властивостей, розкривають широкі перспективи застосування чавунів у різних галузях промислового виробництва. Зокрема, для роботи в умовах високотемпературної газової корозії починаючи від звичайного повітряного середовища і закінчуючи середовищами з високою корозійною активністю, (середовище водяної пари чи з високою концентрацією інших газів) застосовують жаростійкі матеріали.

В якості жаростійких матеріалів широко застосовують високолеговані сплави, які легують дорогокоштуючими елементами хромом та нікелем, вміст яких досягає більше 30%. Тим не менш, термін експлуатації деталей машин та механізмів із жаростійких сплавів обмежений, що зумовлює підвищені витрати. Одним з перспективних шляхів зниження витрат на жаростійкі вироби, деталі, при збереженні їх робочих характеристик, у тому числі і терміну служби є виготовлення таких їх з високолегованого алюмінієвого жаростійкого чавуну. Виливки з алюмінієвого чавуну відрізняються, перш за все своєю жаростійкістю як у повітряному середовищі (до 1100 ° C), так і в середовищах сірки, сірчистого газу, оксидів ванадію та парів води. Слід зазначити, що вони можуть працювати і як зносостійкі вироби, що мають високу міцність за нормальної та підвищеної температури. При цьому вони легші і дешевші, ніж виливки з високохромистих сталей і чавунів аналогічного призначення. Тому дослідження особливостей структурно-фазових перетворень та формування компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну для отримання високоякісного лиття є актуальним.

Метою роботи є визначення впливу факторів на формування структури та компактної форми графіту виливків з алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш для досягнення найвищого ступеня сфероїдизації графітних включень.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати склад, структурно-фазові перетворення та властивості високолегованих алюмінієвих жаростійких чавунів.

3. Розробити методику дослідження умов утворення компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну з використанням методу вимірювання активності кисню.

4. Запропонувати принципова схема пристрою для вимірювання активності кисню в розплаві чавуну.

5. Вибрати основні методики дослідження, хімічного складу, структури та властивостей ливарних алюмінієвих чавунів.

6. Дослідити структурно-фазові перетворення при кристалізації високолегованого алюмінієвого чавуну.

7. Провести експериментальні дослідження залежності активності кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 від кількості сфероїдизуючого модифікатора (РЗМ), при якій досягається найвищий ступінь сфероїдизації графітних включень.

Об'єкт дослідження – процес досягнення найвищого ступеня сфероїдизації графітних включень.

Предметом дослідження – закономірності кристалізації високолегованого алюмінієвого чавуну та формування його структури.

Апробація результатів дослідження.

Основні результати кваліфікаційної магістерської роботи доповідались і обговорювались на Всеукраїнському творчому конкурсі наукових робіт «Процеси та обладнання машинобудівних виробництв» Центральноукраїнський національний технічний університет м. Кропивницький.

РОЗДІЛ 1

СКЛАД, СТРУКТУРНО-ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИСОКОЛЕГОВАНИХ АЛЮМІНІЄВИХ ЖАРОСТІЙКИХ ЧАВУНІВ

1.1 Жаростійкі сплави їх класифікація та вимоги

Інтенсивний розвиток техніки показують, що чавун і надалі займатиме переважне значення серед інших матеріалів в машинобудуванні. Доступність, простота та дешевизна виготовлення виливків із чавуну, та різноманітність його властивостей, розкривають широкі перспективи застосування чавунів у різних галузях промислового виробництва.

Практика використання виливків з чавуну свідчить, що експлуатаційні властивості деталей значною мірою залежать від особливостей структурних складових у сплавах. Слід зазначити, що у визначенні структури чавуну відіграє хімічний склад, технологія виробництва виливків та термічна обробка.

Процес легування - найбільш поширений спосіб формування переважної більшості спеціальних властивостей у залізовуглецевих сплавів [8]. На особливу увагу заслуговує така властивість сплавів як жаростійкість. Вироби із жаростійких сплавів мають відносно короткий термін експлуатації, тому використання легованих чавунів, як жаростійкі матеріали, значно здешевлює вартість литої продукції.

Звичайні низьколеговані чавуни (сірий, ковкий, високоміцний) при нагріванні в окисному середовищі зазнають руйнівної дії корозії, а в результаті графітизації збільшуються в об'ємі.

Спеціальні жаростійкі леговані чавуни значно менше піддаються - окисленню та зростанню при нагріванні в окислювальних газових середовищах.

Відповідно до ДСТУ 8851:2019 [1] жаростійкі чавуни повинні мати опір окалиноутворення не більше 0,5 - г/(м²·год) збільшення маси; та зростання не більше 0,2% при температурі експлуатації протягом 150 год.

Леговані чавуни при певному вмісті в них алюмінію, кремнію, хрому, нікелю мають підвищену жаростійкість; Такі легуючі елементи, як алюміній, кремній, хром забезпечують утворення на поверхні чавуну щільних оксидів заліза, шпинелів, а також власних оксидів, захищаючи її від корозії. Крім того, вони забезпечують стабільність структури під час нагрівання, знижуючи зростання чавуну.

Відповідно до ДСТУ 8851:2019 «Чавун, легований для виливків зі спеціальними властивостями. До жаростійких чавунів відносяться хромисті, крем'янисті, алюмінієві чавуни з пластинчастим і кулястим графітом. Високонікелеві корозійностійкі і жароміцні чавуни також мають високу жаростійкість, хоча їх застосування як жаростійких обмежується через високу ціну і дефіцитність нікелю.

Високохромисті білі чавуни і високоалюмінієві чавуни мають найвищий - рівень жаростійкості, проте їх застосування обмежується через погану оброблюваність, схильність до утворення тріщин у виливках і дефектів у вигляді пористості і полон.

Алюмінієві чавуни в певних умовах роботи забезпечують економічно виправданий рівень жаростійкості литих деталей. Жаростійкість оцінюється за двома показниками: окалиностійкості та стійкості проти росту. Стійкість росту чавуну оцінюють за відносною зміною розмірів зразка при нагріванні. Методика випробування чавуну зростання наведена в ДСТУ 8851:2019 [1]. Окалиностійкість, відповідно до того ж стандарту, визначають ваговим методом або безпосереднім вимірюванням глибини шару, що зруйнувався під дією корозії.

Склад, температура експлуатації та деякі механічні властивості жаростійких чавунів представлені в таблиці 1.1 та 1.2.

Таблиця 1.1 - Склад, температура експлуатації та механічні властивості жаростійких чавунів [1]

Марка чавуну	Вміст хімічних елементів %							Жаростійкість до Т, °С
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Al	
ЧС5Ш	2,7...3,3	4,5...5,5	≤0,8	≤0,03	≤0,10	0,0-0,2	0,1-0,3	800
ЧЮХШ	3,0...3,8	2,0...3,0	≤0,5	≤0,03	≤0,10	0,4-1,0	0,6-1,5	650
ЧЮ30	1,0...1,2	0,0...0,5	≤0,7	≤0,08	≤0,04	-	29,0-31,0	1100
ЧЮ7Х2	2,5...3,0	1,5...3,0	≤1,0	≤0,02	≤0,30	1,5-3,0	5,0-9,0	800
ЧЮ6С5	1,8...2,4	4,5...6,0	≤0,8	≤0,12	≤0,30	-	5,5-7,0	800
ЧЮ22Ш	1,6...2,5	1,0...2,0	≤0,8	≤0,03	≤0,20	-	19,0-25,0	1100

Алюмінієві жаростійкі чавуни за вмістом алюмінію поділяються на три групи: низьколеговані (0,6...1,5%), середньолеговані (5,0...9,0%) та високолеговані (19,0...30,0%)

Таблиця 1.2 - Механічні властивості жаростійких чавунів [1]

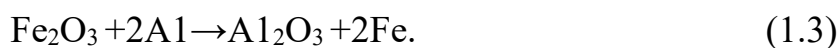
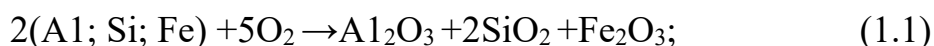
Марка чавуну	Механічні властивості		
	σ_B , МПа	$\sigma_{згин}$, МПа	НВ
ЧС5Ш	290	-	228-300
ЧЮХШ	390	590	187-364
ЧЮ6С5	120	240	235-300
ЧЮ7Х2	120	170	240-286
ЧЮ22Ш	290	390	241-364
ЧЮ30	200	350	364-550

Чавуни з індексом «Ш» (ЧС5Ш, ЧЮХШ і ЧЮ22Ш) є чавуни з кулястим графітом (не менше 80% ШГ).

1.2 Високолегований алюмінієвий чавун як жаростійкий ливарний сплав

Основний елемент, що найбільш сприяє підвищенню жаростійкості сплавів Fe-C, є алюміній. Висока жаростійкість сплавів, легованих алюмінієм, обумовлена наявністю на поверхні цих сплавів щільної, високожаростійкої захисної плівки з оксиду алюмінію Al_2O_3 . Алюміній при його вмісті в залізовуглецевому сплаві, крім взаємодії з киснем повітря, відновлює оксиди заліза та інших елементів, присутніх у сплаві. Тому чавунні виливи, що леговані достатньою кількістю алюмінію, на повітрі, особливо при підвищених температурах, покриваються міцною оксидною плівкою алюмінію, яка і захищає поверхню виливів від подальшого окиснення [2].

Механізм окислення чавунів, легованих алюмінієм, можна представити, ґрунтуючись на теорії [2, 9], розроблених для сплавів Fe-Cr-Al. При високому вмісті алюмінію в чавунах, відбувається складний процес взаємодії атомів алюмінію з киснем повітря та оксидами кремнію Si та заліза Fe, що описується наступними реакціями:



Можна бачити, що перша реакція протікає при помірних температурах, а (1.2), та (1.3) відбуваються при високих температурах, коли рухливість атомів алюмінію стає досить високою [2, 9]. Встановлено, що з часом параметри решітки оксидної плівки Fe-Al сплаву відповідає параметру чистого оксиду Al_2O_3 [2, 10]. Слід зазначити, що процес окислення алюмінієвого чавуну не відрізняється принципово від окислення сталей, що містять алюміній.

Зазначимо, що наявність у структурі чавуну пластинчастого графіту сприяє прискоренню процесу окислення чавуну, оскільки включення пластинчастого графіту окиснюється з середини, тому пластинчаста форма графіту є небажаною для високожаростійких чавунів.

Одним з найбільш перспективних жаростійких алюмінієвих чавунів є алюмінієвий чавун марки ЧЮ22Ш, що має високу жаростійкість до 1100 °С в повітряному середовищі. Крім того, даний сплав жаростійкий агресивних середовищах, що містять сірку, сірчистий газ, оксиди ванадію і пари води [1, 2]. Жаростійкий алюмінієвий чавун ЧЮ22Ш також має значні показники жароміцності, що наведені в таблиці 1.3 [2].

Таблиця 1.3 - Показники жароміцності алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш [2]

Значення міцності при розтягуванні σ_b , МПа					
У вихідному стані	Тривалість витримки при 1000 ° С/год.				
	100	200	300	600	1100
410	410	300	360	340	430
430	350	390	330	360	350

Жаростійкий алюмінієвий чавун має також високу тривалу міцність, таблиця 1.4 [5].

Таблиця 1.4 - Тривала міцність та швидкість повзучості алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш при високій температурі

Марка чавуну	Тривала міцність при 873 К		Швидкість повзучості, %/год
	Напруга, МПа	Час до руйнування, год	При температурі 973 К та напруженість 30 МПа
Чавун з кулястим графітом ЧЮ22Ш	100	1000	$4,0 \times 10^{-5}$

При температурах 900...1100 °С інтенсивність окислення алюмінієвого чавуну в повітряному середовищі описується параболічною залежністю [4]:

$$y^A = B \cdot t, \quad (1.4)$$

де y - Зміна маси чавуну, р.;

t - час, с;

A і B – коефіцієнти, значення яких наведені у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 - Значення параметрів A та B рівняння (4)

Температура, °C	значення коефіцієнтів	
	A	B
900	2,85	2,46
1000	2,86	5,43
1100	2,15	1,60

У разі підвищення температури інтенсивність процесу окислення зростає. При 1200° процес окислення з достатньою точністю може бути описаний рівнянням: $y = 0,38 \cdot t$.

Захисні властивості оксидів на поверхні виливків із чавуну ЧЮ22Ш забезпечують його працездатність при температурі 1100° на повітрі біля 10 років, про що свідчать дані, таблиця 1.6 [4].

Таблиця 1.6 – Дані окалиностійкості високолегованого алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш на повітрі [4, 20]

Температура випробування, °C	Збільшення маси (г/м) при тривалості випробування, год				
	100	250	500	1000	8760 (1 рік)
900	7,2	10,0	12,8	15,3	33,0
1000	9,1	12,5	16,0	20,1	43,5
1100	10,8	16,6	23,6	27,7	87,5
1150	19,0	42,8	-	156,0	-
1200	29,1	80,2	146,3	312,4	2700,0

Наочно ця залежність представлена рисунку 1.1 [4].

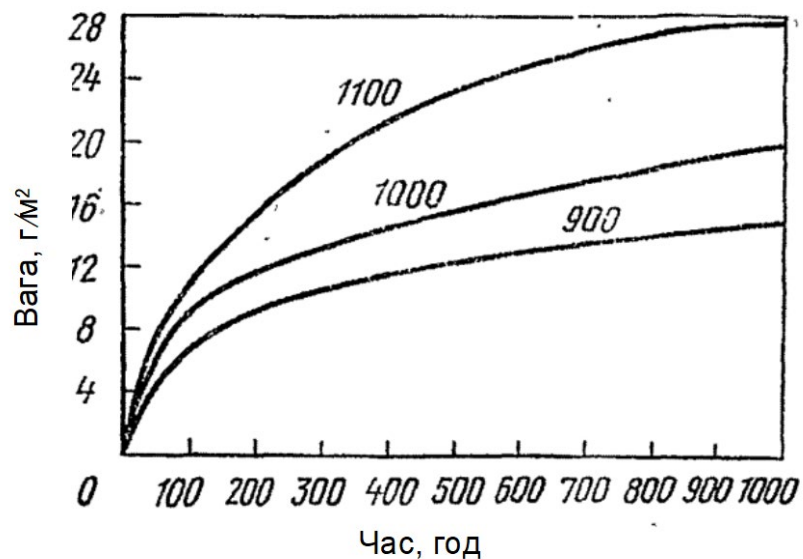


Рисунок 1.1 – Окислення алюмінієвого чавуну на повітрі.

900, 1000, 1100 – температури окислення, °C

Цей чавун має також високу окалиностійкість при температурах до 900°C у середовищі перегрітої водяної пари і сірчистого газу, що містить 12 % SO₂ (табл. 1.7).

Таблиця 1.7 - Показники окалиностійкості високолегованих алюмінієвих чавунів при температурі 900° C у середовищі сірчистого газу та водяної пари [4]

Марка чавуну	Середа	Збільшення маси (г/м) при тривалості випробування, год				
		150	300	500	1000	За рік
ЧЮ22	SO ₂	16,8	22,8	26,1	34,0	53,5
ЧЮ22Ш	SO ₂	21,4	23,5	26,0	30,0	47,0
ЧЮ22	H ₂ O (пар)	46,2	51,0	58,1	70,6	98,8
ЧЮ22Ш	H ₂ O (пар)	32,4	36,2	42,6	50,7	75,0

Окалиностійкість алюмінієвого чавуну з пластинчастим графітом трохи нижче, ніж у чавуну з кулястим графітом, але ця різниця не суттєва у порівнянні з впливом форми графіту на окалиностійкість у нелегованих та низьколегованих чавунах.

Зміна вміст вуглецю в алюмінієвому чавуні практично не впливає на рівень його окислювостійкості; а фосфор і мідь дещо підвищують окислювостійкість алюмінієвого чавуну. Так, при вмісті 0,01% Р збільшення маси алюмінієвого чавуну через 150 годин при 1100° С становить 18,2 г/м²; при 0,26% Р – 10,4 г/м²; при 2,5% Cu - 13,1 г/м². Зміна вмісту марганцю в межах 0,2...16% і кремнію в 10...27% практично не впливає на окислювостійкість алюмінієвого чавуну.

Наочно окислювостійкість алюмінієвого чавуну з пластинчастим і кулястим графітом в середовищі водяної пари і в середовищі, що містить 12% сірчистого газу, представлена на рисунку 1.2 [4].

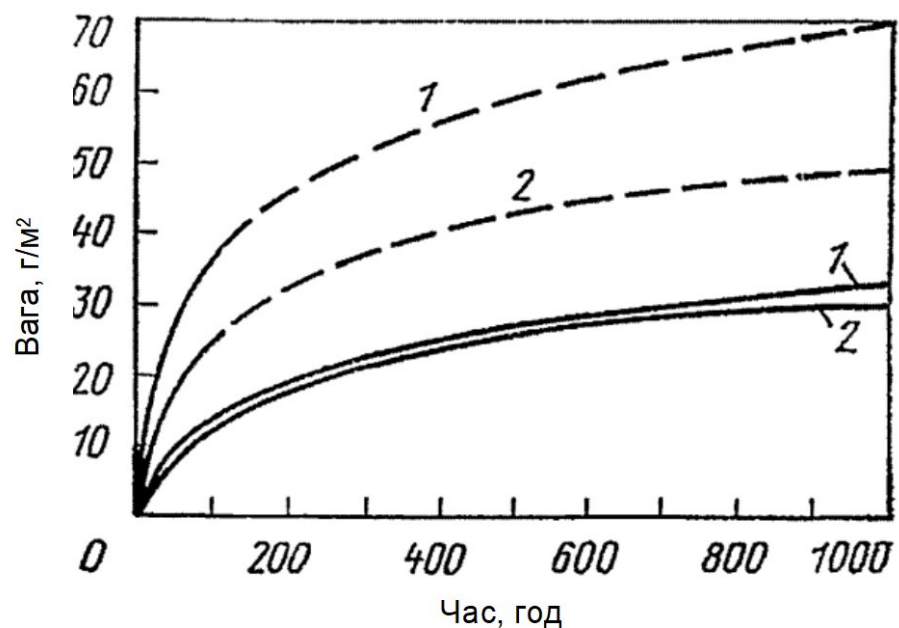


Рисунок 1.2 - Окислення алюмінієвого чавуну при 900° С (суцільні криві - в середовищі, що містить 12% сірчистого газу, штрихові криві - в середовищі водяної пари): 1 – з пластинчастим графітом; 2 – з кулястим графітом

В умовах ванадієвої корозії алюмінієвий чавун ЧЮ22Ш перевершує нержавіючу сталь Х18Н10Т (нині 08Х18Н10Т), що видно на малюнку 3 [4].

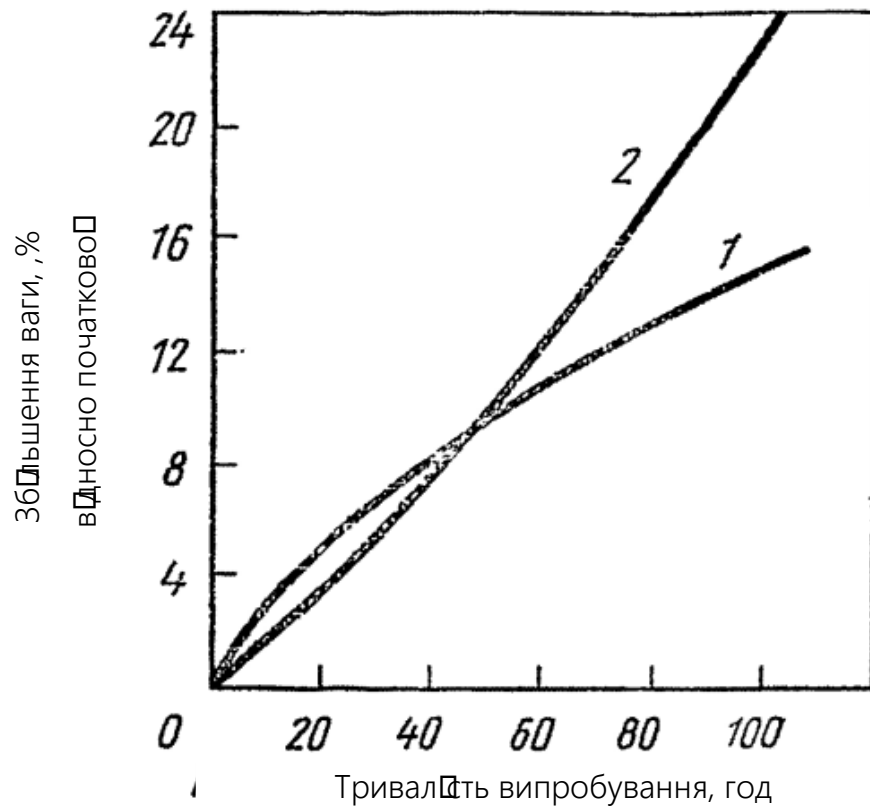


Рисунок 1.3 - Окалиностійкість алюмінієвого чавуну:

1 - чавун ЧЮ22Ш; 2 - нержавіюча сталь 10Х18Н10Т

У таблиці 1.8 наведено порівняльні дані про стійкість хромистого, крем'янистого та алюмінієвого жаростійких чавунів проти високотемпературної корозії на повітрі [6].

Таблиця 1.8 - Порівняльні дані про корозійну стійкість на повітрі жаростійких чавунів

Марка чавуну	Температура випробування, °С	Збільшення маси, мг/см, при тривалості випробування, год	
		500	1000
ЧХ28	1000	-	26,7
ЧС5Ш	1000	336,7	-
ЧЮ22Ш	1000	-	4,5

За даними [12], високотемпературна корозійна стійкість на повітрі кремнієвого чавуну ЧС5Ш низька навіть при вдвічі меншій тривалості випробування (500 год проти 1000 год) вона в 13 і 67 разів менша за корозійну

стійкість відповідно хромистого ЧХ28 і алюмінієвого ЧЮ22Ш чавунів. При цьому алюмінієвий чавун ЧЮ22Ш за інших рівних умов має майже в 6 разів більшу стійкість проти високотемпературної корозії, ніж хромистий чавун ЧХ28. Литі деталі, що працюють у високотемпературному середовищі (в енергетичних котлах) продуктів згоряння вугілля та високосірчистих мазут піддаються так званій «ванадієвій корозії». Результати досліджень у середовищі, що імітують такі умови випробування, хромистого та алюмінієвого чавунів наведені в таблиці 1.9.

Таблиця 1.9 - Показники корозійної стійкості хромистого та алюмінієвого жаростійких чавунів у середовищі «ванадієвої корозії», $t_{\text{вип}}=1000$ год

Марка чавуну	Показники корозійної стійкості за температури 1000 °С.	
	Втрата маси, мг/см	Глибина корозії, мм
ЧХ28	24,4	0,0325
ЧЮ22Ш	3,9	0,0051

У складі вугілля та мазут містяться кремній, залізо, алюміній, магній, ванадій і лужноземельні метали. Вони утворюють легкоплавкі евтектики з температурою плавлення 600...900 °С. Ці евтектики осідають на поверхні елементів котлів. У складі евтектики є легкоплавкий оксид V_2O_5 , який розпушує оксидний шар деталі, розчиняючи захисні плівки з оксидів інших металів (наприклад, оксиду хрому). Внаслідок цього литі деталі котлів швидко руйнуються в умовах високотемпературної (понад 600 °С) "ванадієвої корозії".

1.3 Структура та властивості алюмінієвих чавунів

1.3.1 Діаграма стану сплавів Fe-Al та Fe-Al-C.

Діаграма станів сплаву Fe-Al показана на рисунку 1.4 [2, 8, 13-19]. Сплави, що містять алюміній в межах 0...36% Al, утворюють безперервний ряд твердих розчинів. В цій області можна спостерігати перетворення з упорядкованої структури на неупорядковану та з магнітного стану на немагнітний;

перетворення не пов'язані з фазовими змінами, тому межі на діаграмі показані з різними штриховими лініями.

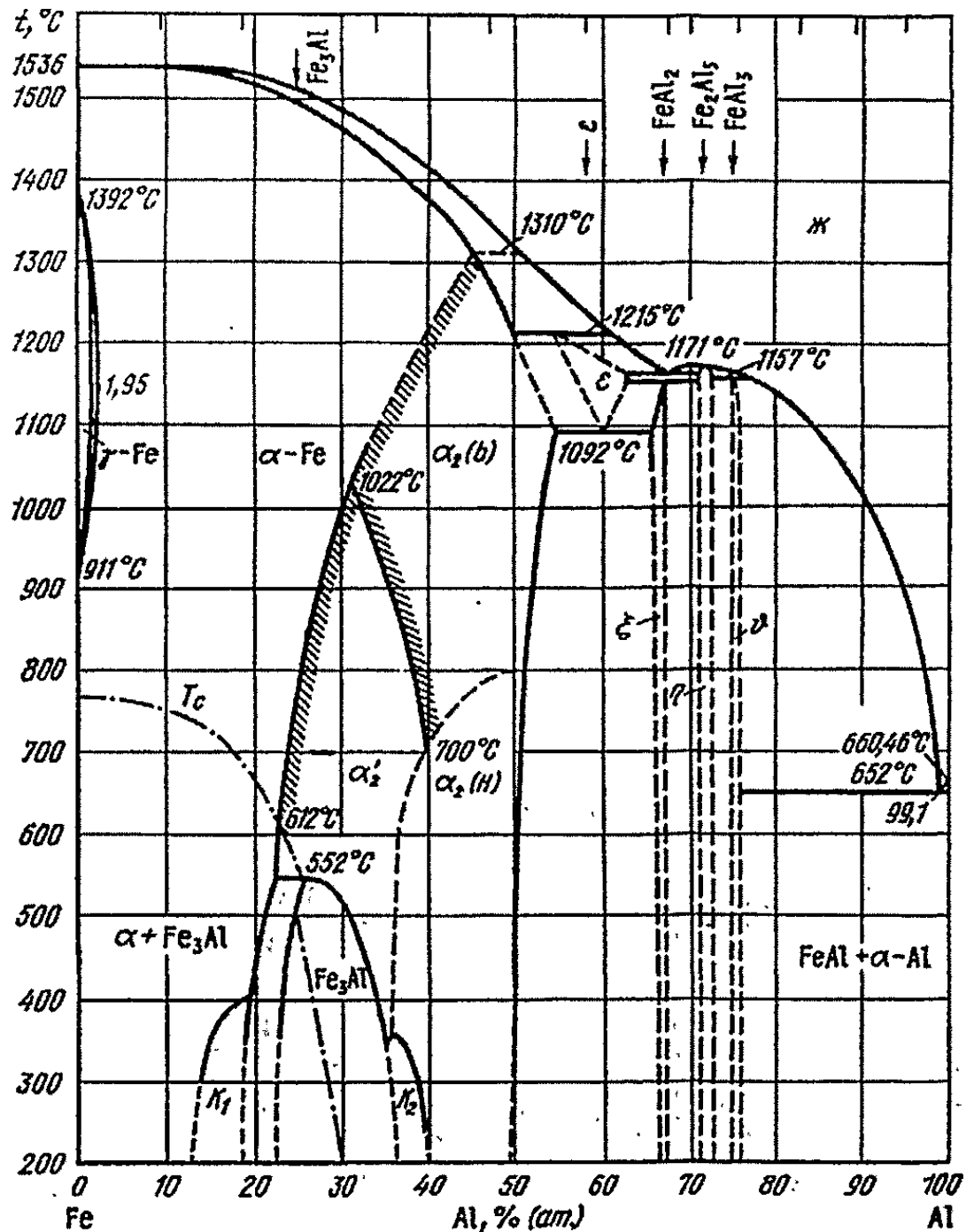


Рисунок 1.4 – Діаграма стану системи Fe-Al

У системі сплаву Fe-Al γ -область замикається при вмісті 1...1,2 % Al. Сплави, що не входять в область, твердого розчину, що містять більше 36% Al, практично не застосовуються в промисловості.

У системі Fe-Al-C, крім твердого γ -розчину виявляються й інші структурні складові, обумовлені наявністю вуглецю у вигляді графіту, карбиду

алюмінію Al_4C_3 і так звана ϵ - фаза – тверда і крихка магнітна фаза, що має кристалічну решітку гранецентрованого куба, що являє собою подвійний карбід заліза [2] Fe_3AlC_x .

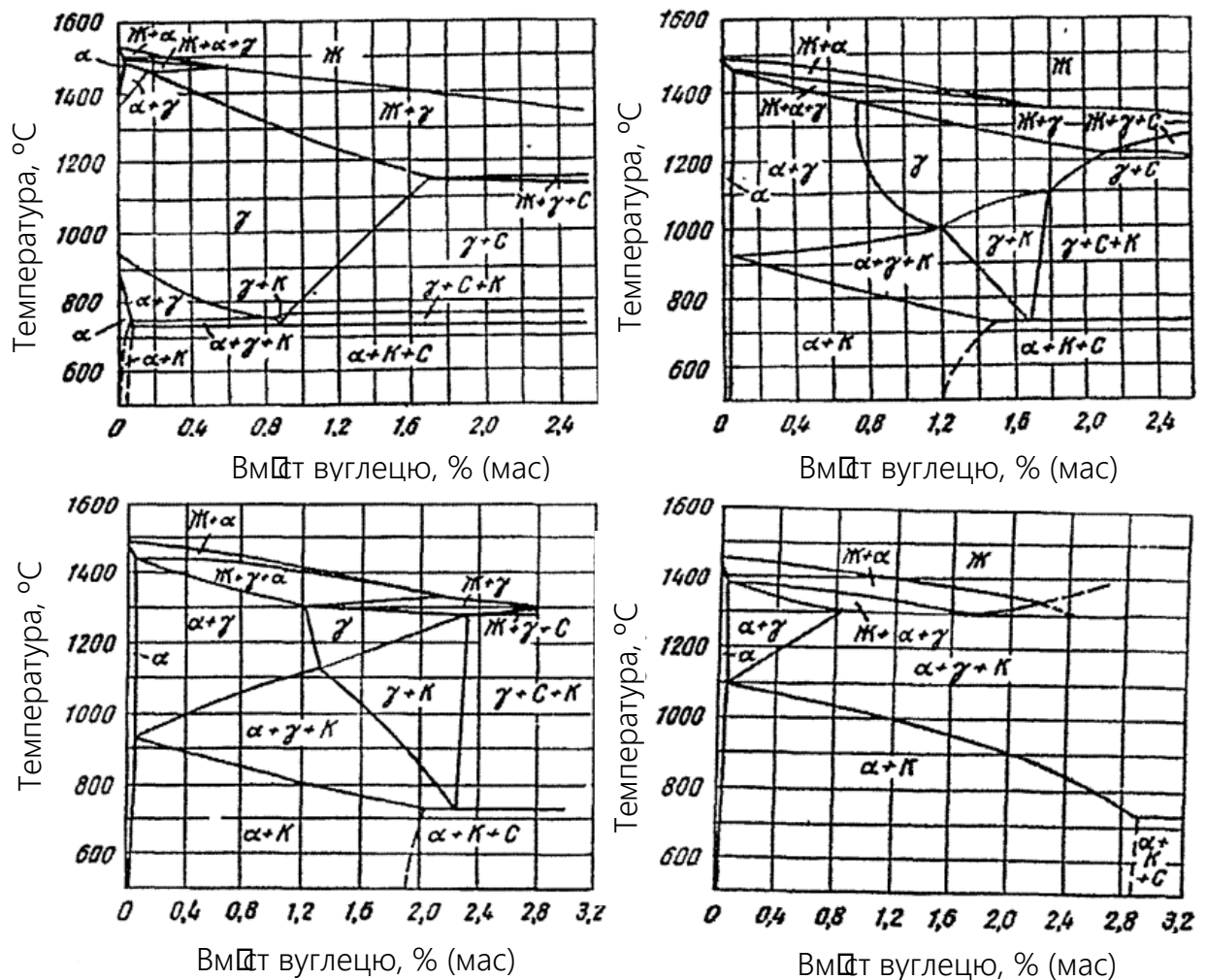


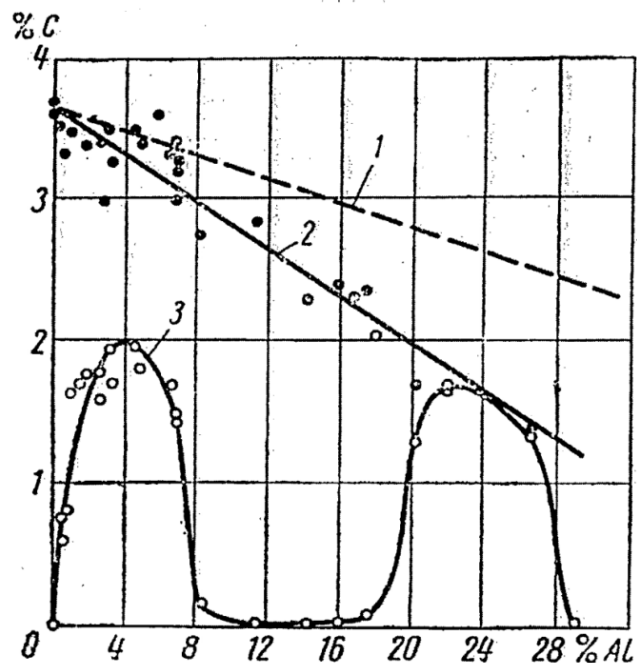
Рисунок 1.5 – Розрізи діаграми стану сплавів системи Fe-Al-C: α – твердий розчин алюмінію в α -залізі; γ – твердий розчин алюмінію в γ -залізі; ϵ – фаза, з'єднання $(FeAl)_n$ з вуглецем; C – графіт

1.3.2 Вплив алюмінію на структуру чавуну.

В результаті багаточисельних досліджень впливу алюмінію на процес графітизації чавуну встановлено, що алюміній залежно від його вмісту в чавуні може бути графітоутворюючою або карбідоутворюючою елементом. Сплави Fe-C-Al, що містять до 30% Al, мають дві області графітизації: перша охоплює сплави з масовим вмістом алюмінію до 8%, а друга – 18...26%.

При вмісті алюмінію в чавуні в межах 9...16% вуглець знаходиться переважно у зв'язаному (у подвійний карбід) стані. У зв'язаному стані знаходиться вуглець і за вмістом у чавуні понад 26 % Al [2, 4, 8, 20-22].

З діаграми (рис. 1.6), можна бачити, що загальний вміст вуглецю зменшується пропорційно кількості доданого в чавун алюмінію і при 30% Al вміст вуглецю в чавуні не перевищує 1,5% незалежно від його початкового вмісту у вихідному чавуні. При збільшенні вмісту вуглецю вище за межу розчинності надлишок його виділяється у вигляді графітової стигли.



- 1 - теоретична зміна вмісту вуглецю в чавуні при розведенні його алюмінієм; 2 - фактичний вміст вуглецю в чавуні при заданій кількості алюмінію;
3 - вміст графіту в чавуні. ● - експериментальні дані визначення загального вуглецю в чавуні за відповідного вмісту алюмінію; ° - експериментальні дані визначення графіту в чавуні при відповідному вмісті алюмінію.

Рисунок 1.6 - Залежність між вмістом загального вуглецю, графіту та вмісту алюмінію в чавуні

На діаграмі чітко видно два максимуми – перший відповідає 4% Al, а другий 24% Al. Однак необхідно враховувати, що в технічних алюмінієвих - чавунах на процес графітизації будуть впливати й інші елементи, зокрема кремній та марганець [2-4, 8].

В алюмінієвих чавунах, залежно від вмісту алюмінію при нормальній - температурі, можуть бути присутніми наступні фази: ферит, залізоалюмінієвий карбід Fe_3AlC_x , алюмінієвий карбід Al_4C_3 та графіт. Дані мікротвердості цих фаз представлені в таблиці 1.10 [2, 8, 20]:

Таблиця 1.10 - Мікротвердість фаз високолегованих алюмінієвих чавунів

Фаза	Ферит	Карбід Fe_3AlC_x	Карбід Al_4C_3
Мікротвердість, HV	360...400	640...850	960...1000

Чавун, що містить до 8% алюмінію, має структуру, що складається з ферито-перлітної металевої матриці, графіту та карбіду Fe_3AlC_x , (рис. 1.7а) та по мірі його збільшення – частка фериту в матриці зростає. При цьому кількість графіту в структурі чавуну змінюється за екстремальною залежністю, досягаючи максимального рівня при 4 % Al. При цьому, частка карбідної фази змінюється по зворотній залежності з мінімумом при тому самому вмісті Al (рис. 6) [21].

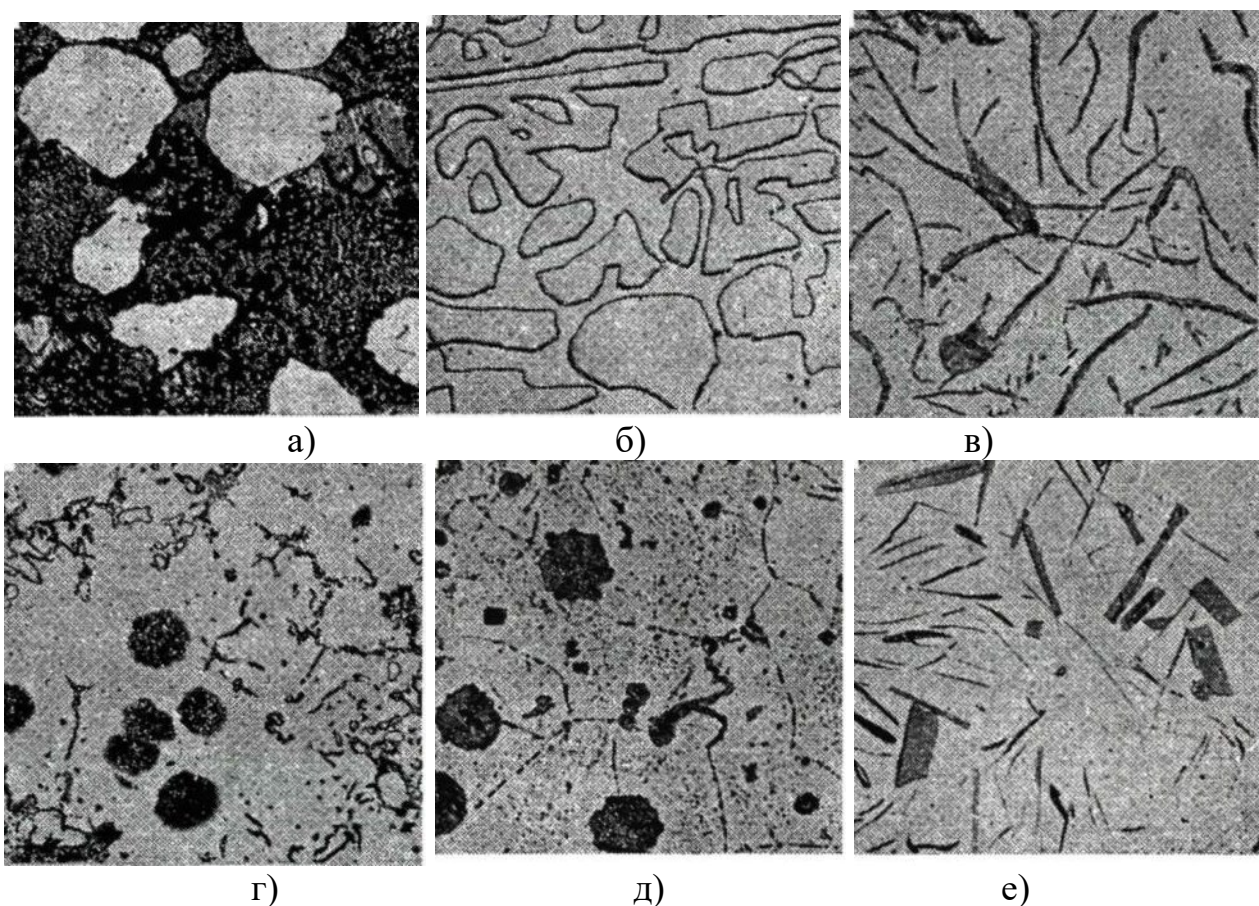


Рисунок 1.7 – Вплив вмісту алюмінію на структуру чавуну: а – 5...8%; б – 11...17%; в, д – 19...25 %; е – більше 26%; чавуни «г» і «д» модифіковані церієм та кальцієм відповідно)

При подальшому збільшенні вмісту алюмінію (до 16 %) графітна фаза не утворюється, і структура чавуну складається з феритної металевої матриці та карбіду Fe_3AlC_x (рис. 1.7, б).

Вміст алюмінію понад 17...18 % знову утворюється у структурі чавуну графітну фазу. Кількість його у міру збільшення вмісту алюмінію знову змінюється за екстремальної залежності досягає максимуму при 24% Al (рис. 1.6). При цьому вміст алюмінію в межах 19...25% складає структуру чавуну з фериту та графіту пластинчастої форми (рис. 1.7, в).

При обробці чавуну церієм, що містить 19...25% алюмінію, графітні частинки набувають кулястої форми, а в його структурі з'являється карбідна фаза у вигляді включень Fe_3AlC_x , що розташовуються по межах зерен фериту (рис. 1.7, г).

При модифікуванні чавуну кальцієм, що містить 19...25% алюмінію, карбідна фаза Fe_3AlC_x не утворюється, і матриця стає феритною, а графітні частинки набувають більш правильної кулястої форми (рис. 1.7, д). За даними джерела [13], правильну кулясту форму графіту можна отримувати обробкою церієм спільно з феросиліцієм.

При вмісті в чавуні понад 26 % алюмінію більш стійким стає карбід Al_4C_3 . Тому структура чавуну, що містить понад 29 % алюмінію, складається з фериту та карбіду Al_4C_3 (рис. 1.7, е) [2, 4, 8].

1.3.3 Ливарні властивості високолегованих алюмінієвих чавунів.

Дослідження властивості високолегованих алюмінієвих чавунів, показали, що їх ливарні властивості дещо гірші, ніж нелегованих. При цьому чавуни, леговані алюмінієм, схильні до газонасичення, окислення при плавці і розливанні, утворення усадкових і газоусадкових дефектів [2, 4, 8, 20].

Вміст вуглецю, алюмінію кремнію, марганцю та ін., тобто хімічний склад та температура перегрівання над точкою ліквідусу, все це істотно впливає на рідкотекучість високолегованих алюмінієвих чавунів. Згідно з даними [2], на

рідкотекучість алюмінієвих чавунів значно впливає ступінь окисненості та газонасиченості металу (табл. 1.11).

Таблиця 1.11 - Вплив температури на рідкотекучість високолегованого-алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш.

Вміст елементів, %		Температура чавуну, °С	Температура заливання, °С	Довжина залитої спіралі, мм
Al	C			
21,20	2,0	1600	1460	805
21,20	2,0	1500	1430	830
21,25	2Д	1450	1350	590

З табличних даних можна бачити, що спіраль, залита перегрітим до 1600°С чавуном при температурі 1460°С, була на 25 мм коротше спіралі, залитої при 1430°С таким же чавуном, але перегрітим до 1500°С. Аналогічна закономірність спостерігається і у високолегованих алюмінієвих чавунів із пластинчастою формою графіту. Меншу рідкотекучість алюмінієвого чавуну, перегрітого до 1450 °С і залитого при 1350 °С, можна пояснити меншою на 80...110 °С температурою заливання.

Збільшення вмісту вуглецю та модифікування також підвищують рідкотекучість. Кожен відсоток вуглецю в чавуні збільшує рідкотекучість в 1,5...2 рази, про що свідчать дані джерела [2], (табл. 1.12).

Таблиця 1.12 - Рідкотекучість чавуну легованого алюмінієм

№ зразку	Вміст елементів, %							Температура розплаву, °С	Довжина спіралі, мм;
	C	Si	Mn	S	P	Cr	Al		
1	1,01	2,06	0,54	0,048	0,070	0,05	21,0	1400	415
2	1,17	1,22	0,40	0,020	0,090	0,07	21,4	1400	500
3	2,55	0,93	0,25	0,001	0,018	-	21,4	1400	587
4	1,96	1,82	0,49	0,038	0,051	-	17,8	1470	992
5	2,52	0,92	0,32	0,002	0,012	-	11,2	1400	767

З табличних даних можна бачити, що довжина залитої спіралі чавуну з вмістом алюмінію 11,2...21%, становить 415...990 мм при температурі 1400...1470°C, а з підвищенням у чавуні вмісту вуглецю рідкотекучість збільшується. Так, при вмісті 1,01% і 0,07% Р довжина залитої спіралі чавуну, що містить 21% Al при температурі 1400°C, становить 415мм, а при 2,55% і порівняно низькому вмісті фосфору (0,018% Р) довжина залитої спіралі дорівнює: 587 мм. Крім того, автори даного джерела вказують на те, що за інших рівних умов подальше збільшення вмісту алюмінію в чавуні знижуватиме рідкотекучість.

Зниження вмісту фосфору з 0,16...0,2 до 0,03...0,08% зменшує рідкотекучість в 1,5...2 рази. При підвищенні вмісту марганцю з 0,35...0,72% рідкотекучість зростає на 10...15%. Рідкотечність алюмінієвого чавуну, що містить 20...23% Al; 1,8...2,1% С; 0,5...0,7% Mn і 0,16...0,2% Р близька до рідкотекучості сірого чавуну (рис. 1.8) [4].

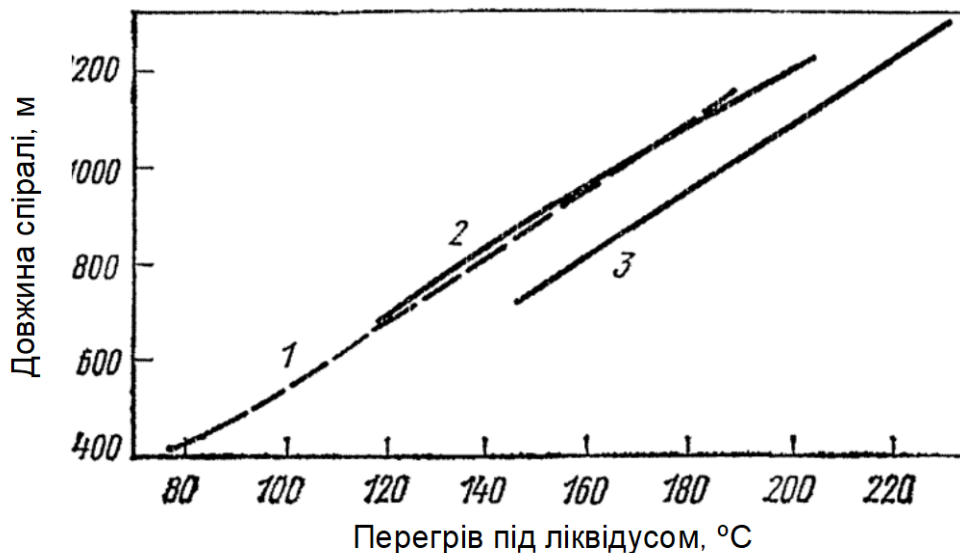


Рисунок 1.8 – Залежність вплив температури на рідкотекучість алюмінієвих чавунів: 1 – нелегований чавун; 2 і 3 – чавун ЧЮ22Ш, що містить 0,16...0,23 та 0,003...0,008 % фосфору відповідно

Схильність до утворення усадкових раковин у алюмінієвого чавуну з кулястим графітом в 1,5...2 рази вище, ніж у чавуну з пластинчастим графітом. Відносний об'єм усадкових раковин становить 4,5...8 %, тому відливати деталі з ЧЮ22Ш слід з прибутками до 20% від маси виливки. Лінійна усадка чавуну з

кулястим графітом, що містить 19...25% Al, становить 2,2...2,5%, що значно перевищує велику лінійну усадку сірого чавуну (0,95...1,05%). Підвищена лінійна усадка легованого алюмінієм чавуну вказує на необхідність застосування формувальних та стрижневих сумішей з гарною піддатливістю [2].

За даними [4] об'ємна усадка високолегованого чавуну з пластинчастим графітом становить в межах 2,6...5,7 %, а високоалюмінієвого чавуну з кулястим графітом – 3,2...7,0 %. Величина усадки залежить від температури розплаву при заливанні, і чим вона нижча тим менша величина усадки.

Показано, що зміна вмісту алюмінію в чавуні істотно впливає величину лінійної усадки [8]. Алюмінієві чавуни з концентрацією понад 12...14 % Al мають таку ж усадку, як і сталь (1,8...2,0 %). Збільшення лінійної усадки, можна пояснити відносно низьким вмістом вуглецю в таких чавунах. Модифікування алюмінієвих чавунів Mg, Mg+Ce та Ce сприяє ще більшому зростанню величини лінійної усадки. Так при 20...24% Al усадка високоміцних алюмінієвих чавунів зростає до 2,4...2,5%. Високоміцні алюмінієві чавуни мають більшу схильність до утворення зосереджених усадкових раковин.

Таким чином, підвищена в порівнянні зі звичайним алюмінієвим чавуном схильність до об'ємної усадки вимагає додаткового живлення виливків при затвердінні. Тому при виготовленні багатьох виливків із високоміцних алюмінієвих чавунів слід застосовувати методи живлення виливків такі ж, як і для сталевого лиття. Специфіка ливарних властивостей алюмінієвих чавунів, вимагає врахування даних особливосте при розробці та реалізації технології лиття для отримання виливків високої якості.

1.3.4 Фізичні властивості високолегованих алюмінієвих чавунів.

Чавун, що легований алюмінієм в кількості 19...25% Al, має щільність в межах $5,5...6,0 \cdot 10^3$ кг/м³, при цьому Чавун з кулястою формою графіту має приблизно таку ж щільність, як і чавун із пластинчастим графітом [2].

Теплопровідність, при нормальній температурі, алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш нижче, ніж у сірого та високоміцного чавуну. Слід зазначити, що з

підвищенням температури коефіцієнт теплопровідності алюмінієвого чавуну зростає, тоді як у нелегованих чавунів він знижується. В результаті при 950 °С коефіцієнт теплопровідності алюмінієвого чавуну з кулястим графітом більш ніж у 2 рази вище, ніж сірого та високоміцного чавунів [4-5, 20].

Коефіцієнт лінійного розширення алюмінієвого чавуну зростає зі збільшенням температури та вмісту алюмінію. Коефіцієнт лінійного розширення чавуну з кулястим графітом дещо вищий, ніж такого ж чавуну з пластинчастим графітом [4-5]. Температурна залежність коефіцієнта термічного розширення наведена в таблиці 1.13 [2,20].

Таблиця 1.13 – Вплив температури змiну коефіцієнта термічного розширення алюмінієвих чавунів.

Марка чавуну	Форма графіту	Значення коефіцієнта термічного розширення $\alpha \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$					
		100 °C	300°C	500°C	700°C	800°C	900°C
ЧЮ22	Пластинчаста	14,2	18,9	17,4	26,9	26,9	
ЧЮ22Ш	Куляста	17,0	21,0	23,0	27,5	27,5	28,0
ЧЮ22Ш	Куляста	17,5	21,0	24,8	27,5	27,5	

Можна бачити, що при вмісті більше 19 % алюмінію, чавун є парамагнітним, має підвищений коефіцієнт лінійного розширення, низьку теплопровідність та підвищений питомий електроопір $140 \cdot 10^8 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ [3].

1.3.5 Механічні властивості високолегованих алюмінієвих чавунів.

Високолегований алюмінієвий чавун із кулястим графітом у широкому - інтервалі температур забезпечує більш високі механічні властивості, ніж аналогічно легований чавун із пластинчастим графітом (табл. 1.14) [21].

З табличних даних бачимо, що міцність і твердість чавуну ЧЮ22Ш відповідно у 2...4 та 1,3...1,7 разів вища, ніж у чавуну ЧЮ22. При підвищених температурах чавун із кулястим графітом ЧЮ22Ш, на відміну від чавуну із пластинчастим графітом ЧЮ22, має помітну пластичність. Алюмінієвий чавун з

кулястою формою графіту за міцністю при кімнатній температурі в 3...4 рази перевищує аналогічний чавун з пластинчастою формою графіту [2, 20].

Таблиця 1.14 - Вплив температури на механічні властивості високолегованих алюмінієвих чавунів

Показники механічних властивостей	Марка чавуну	Температура, °С			
		20	500	700	800
Міцність σ_B , МПа	ЧЮ22Ш	300-400	350-420	250-320	140-200
	ЧЮ22	70-180	100-140	60-80	30-50
Відносне подовження $\delta\%$	ЧЮ22Ш	-	-	1,5-3,0	4-10
	ЧЮ22	-	-	-	-
Твердість HB	ЧЮ22Ш	240-360			
	ЧЮ22	143-285			

Межа міцності на розтяг у чавуну з кулястим графітом коливається в межах 313,6...362,6 МПа. Значення ударної в'язкості у цього чавуну, хоч і перевищують у 2 рази ударну в'язкість такого ж чавуну з пластинчастим графітом, проте є низькими і не перевершують ударної в'язкості звичайного сірого чавуну. Дані механічних властивостей чавуну, модифікованого церієм, наведено у таблиці 1.15.

Таблиця 1.15 - Механічні властивості алюмінієвого чавуну з кулястим графітом.

№ п/п	Вміст елементів, %					Механічні властивості		
	C	Si	Mn	Al	Ce	σ_B , МПа	σ_u МПа	HB
1	1,77	1,64	0,69	23,9	-	342	410	319
2	1,57	1,87	0,69	19,5	-	362	460	360
3	1,70	1,75	0,59	23,4	0,090	314	421	366
4	1,56	1,80	0,61	24,3	0,157	337	392	373
5	1,75	1,66	0,56	22,6	-	339	362	357
6	1,97	1,53	0,30	19,7	-	314	-	-

Твердість алюмінієвого чавуну з кулястим графітом дещо вище (на 50...80 одиниць за Брінелем), ніж чавуну з пластинчастим графітом. Чавуни, леговані алюмінієм (19...25 %), зберігають достатню твердість і міцність при високих температурах. При 900 °С чавуну твердість становить НВ 90. Міцність на розтяг при 800 °С (короткочасне випробування) алюмінієвого чавуну з кулястим графітом перевищує міцність всіх відомих жаростійких чавунів і приблизно в 2 рази міцність сплаву Х28 (15Х28).

Чавун, що містить вміст алюмінію 22...24% А1 має найменшу твердість, а при більшому або меншому вмісті А1 твердість підвищується. Підвищення вмісту кремнію знижує ударну в'язкість чавуну і підвищує його твердість. Чавун зберігає високі механічні властивості при 600 °С. В результаті короткочасних випробувань при 600 °С встановлені наступні показники: $\sigma_B \geq 350$ МПа, $\delta \geq 0,5\%$, $K_{SC} \geq 50$ кДж/м², $E \geq 130$ ГПа.

Внаслідок тривалих випробувань при заданому напруженні 100 МПа час до руйнування становить 1000 год. Швидкість повзучості при заданому напруженні $\sigma = 30$ МПа і $T = 700$ °С становить $4,0 \dots 10^{-5}$ %/год. Міцність алюмінієвого чавуну з кулястим графітом при 20 °С після тривалої витримки при високих температурах практично зберігає початкове значення. Залежність модуля нормальної пружності жаростійкого алюмінієвого чавуну від температури за джерелом [21] наведені в таблиці 1.16.

Таблиця 1.16 – Вплив температури на модуль пружності високолегованих алюмінієвих жароміцних чавунів

Тип жаростійкого чавуну	Значення модуля нормальної пружності E, МПа при температурах, °С					
	20	250	450	600	700	800
Чавун із пластинчастим графітом ЧЮ22	97000	93000	79000	73000	69000	-
Чавун з кулястим графітом ЧЮ22Ш	178000	169000	140000	128000	124000	88000

Можна бачити, що при температурі 20° С високолегований алюмінієвий чавун з кулястим графітом ЧЮ22Ш має аналогічні значення модуля пружності, як нелегований чавун з кулястою формою графіту ($E = 165000 \dots 185000$ МПа). При цьому він у всьому температурному діапазоні 20...800 °С він має приблизно вдвічі вищі значення модуля пружності, ніж високолегований алюмінієвий чавун з пластинчастою формою графіту ЧЮ22.

1.4 Особливості технології виробництва виливків із алюмінієвого чавуну

Високолеговані алюмінієві чавуни виплавляють трьома способами: 1) змішуванням рідкого чавуну з рідким алюмінієм; 2) плавкою в дуговій печі; 3) плавкою в індукційній печі [2, 5, 19-22].

Аналіз трьох способів плавки алюмінієвих чавунів показує, що найкращим із варіантів є плавка в індукційних печах тиглів з основною або високоглиноземною футеровкою, що забезпечує отримання найвищих показників якості чавуну при мінімальному чаді алюмінію.

При плавці алюмінієвих чавунів використовують наступні шихтові матеріали:

- 1) залізовмісні компоненти – сталевий і чавунний брухт, чавун чушковий;
- 2) науглецьовувачі – електродний бій, графітований коксик, чавун чушковий;
- 3) феросплави – феросиліцій, фероцерій, феротитан, феросиліко-РЗМ;
- 4) алюміній первинний чи вторинний;
- 5) відходи власного виробництва.

1.4.1 Технологія плавка виливків із алюмінієвого чавуну в індукційній печі.

Для плавки алюмінієвих чавунів можна використовувати печі тиглів з кислою і основною футеровкою. Однак якість чавуну, отриманого в печах з

кислою футеровкою нижче, насамперед через підвищену забрудненість неметалевими включеннями. При плавці в індукційних печах також застосовують тиглі, з високоглиноземним футеруванням; Стійкість високоглиноземної футеровки досягає до ста плавок [2, 4, 21].

В якості початкової шихти використовують чавун чушковий, чавунний лом – повернення чавуну і сталевий лом. Після розплавлення початкової шихти отриманий розплав перегрівають до 1450...1520 ° С, а потім в нього невеликими порціями присаджують чушки первинного або вторинного алюмінію. Індукційні печі застосовують переважно промислової частоти, вони забезпечується хороше перемішування розплаву, і чушковий алюміній засвоюється рідким чавуном за 1...2 хв без примусового введення, при цьому практично мало утворюється шлаку. Інтенсивне перемішування розплаву забезпечує високу якість чавуну з низьким вмістом газів і неметалевих включень. Угар алюмінію за одними даними становить 10...20%, а за іншими даними – 5...17% [2, 4].

Рекомендується проводити плавку при помірній інтенсивності перемішування розплаву, оскільки рідкий чавун насичується газами та неметалевими включеннями. Дані щодо впливу деяких технологічних факторів на забрудненість алюмінієвого чавуну неметалевими включеннями наведені в таблиці 1.17.

Таблиця 17 - Вплив типу футерування та обробки церієм на вміст у чавуні - неметалевих включень

Варіант плавки	Місткість тигля печі, кг	Футеровка тигля	Вміст неметалевих - включень, %	Обробка чавуну церієм
1	50	Кисла	0,054	Ні
2	50	Кисла	0,026	Так
3	50	Основна	0,035	Ні
4	430	Кисла	0,026	Ні
5	430	Кисла	0,018	Так
6	430	Основна	0,090	Так

1.4.2 Лиття та обробка алюмінієвого чавуну для отримання графіту кулястої форми

Розплав високолегованого алюмінієм чавуну, призначеного для сфероїдизуючого модифікування, виплавляють в індукційних печах тигельних з основною футеровкою. Найважливішою вимогою до чавуну є низький вміст у ньому сірки (трохи більше 0,03 %). Для отримання графіту кулястої форми розплав чавуну обробляють церієм або кальцієм. Для цього використовують - фероцерій, мішметал, силікоРЗМ або силікокальцій. При застосуванні і силікоРЗМ або силікокальцію в чавуні збільшується вміст кремнію, який надає йому крихкості. Але, з іншого боку, при модифікуванні чавуну кальцієм утворюється менше карбідів Fe_3AlC_x , а графітні включення отримують більш дисперсними і більш правильної кулястої форми. Тому рекомендують алюмінієвий чавун модифікувати фероцерієм разом із силікокальцієм. Алюмінієвий чавун, оброблений церієм, має високу щільність та низький вміст газів [2, 4, 18-22].

Обробку рідкого алюмінієвого чавуну сфероїдизаторами виконують у ковші при температурі 1500°C і витримують після введення модифікатора на протязі 5...7 хв.

Витрата модифікатора, при якому забезпечується куляста форма графіту, за різними даними становить: а) 0,025...0,35% церію; б) 2% силікокальцію; в) 0,20% церію + 0,4...0,6% силікокальцію; г) 0,25% фероцерію + 0,5% феросиліцію ФС75.

Також алюмінієвий чавун ЧЮ22Ш може бути отриманий шляхом використання процесу внутрішньоформеному модифікуванні для обробки розплаву сфероїдизаторами [20].

Підвищена лінійна усадка обумовлює необхідність виготовлення ливарних форм з м'яких піщаних сумішей. Виливки з алюмінієвих чавунів повинні бути сконструйовані з плавними-переходами, з радіусом 10...30 мм.

Через знижену рідкотекучість і необхідність швидкого заливання, через схильність алюмінієвого чавуну до окислення, ливникову систему необхідно

конструювати з елементами, площі перерізів яких на 15...20 % більше, ніж при отриманні виливків з нелегованого сірого чавуну.

Через підвищену схильність до плівкоутворення необхідно забезпечити спокійне заповнення алюмінієвим чавуном порожнини ливарної форми. Для цього слід застосовувати нижньосторонню або сифонну розширюючу ливникову систему. При цьому підведення металу здійснюють тонкі перерізи виливків.

На поверхні розплаву алюмінієвого чавуну завжди утворюється плівка з оксиду алюмінію. Це забезпечує отримання виливків з чистою поверхнею без застосування протипригарних фарб.

Виливки з чавуну ЧЮ22Ш з товщиною стінки до 35 мм отримують без - прибутку. У цьому випадку замість прибутків на верхній частині виливки виконують випор. Виливки з товщиною стінки понад 35 мм одержують із застосуванням невеликих прибутків, при цьому їх загальна маса становить 15...20 % від маси виливки [4]. Температура заливання алюмінієвого чавуну становить 1380...1480 °С.

Показана можливість отримання якісних виливків з алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш литтям за виплавляємими моделями, що дозволяє отримувати виливки з товщиною стінок до 3 мм. Температура керамічних форм перед заливкою рідким чавуном становила 450...550 °С. Метал випускали з печі при температурі 1420...1450 °С, а ківш підігрівали до температури 900 °С [15].

Виливки із високолегованих алюмінієвих чавунів обов'язково піддають відпалу або відпустці. Рекомендовані режими термічної обробки жаростійких чавунів наведені в ГОСТ 7769-82. Відпал використовують для зниження твердості та поліпшення оброблюваності. Його виконують за наступним режимом: нагрівання до 690...750 °С, витримка при цій температурі протягом 6...12 год і охолодження з піччю.

Для зняття внутрішніх напружень використовують відпускання нагріванням до 520...560 °С, витримують протягом 3...4 годин і охолоджують з піччю. Після проведення відпалу виливки з чавуну ЧЮ22Ш мають задовільну оброблюваність різанням.

1.4.3. Застосування високолегованого алюмінієвого чавуну.

Відповідно до ГОСТ 7769-82 алюмінієвий чавун ЧЮ22Ш призначений для роботи в середовищах, що містять сірку, сірчистий газ, оксиди ванадію та пари води. Крім того, даний чавун має високу міцність при нормальній і підвищеній температурах. З огляду на ці якості ГОСТом рекомендується застосування даного сплаву для виготовлення деталей арматури котлів, деталей, що дистанціюють, пароперегрівачів котлів, деталей випалювальних колчеданних печей, нагрівальних кільцевих печей і колосників агломераційних машин.

Найбільше застосування у промисловості відповідно до джерела [2] повинен отримати високожаростійкий чавун з кулястою формою графіту, легований 19...25 % Al, що має високу міцність при кімнатній та підвищеній температурах. На сьогодні актуальним є застосування високолегованих алюмінієвих чавунів для деталей, що працюють в атмосфері повітря та пічних газів при 1100...1150 °C, у середовищі перегрітих парів, сірки та сірчистого газу при температурі близько 1000°; для витяжних парасольок кріолітових ванн, шлакових фурм доменних печей, футерувальних плит камер згоряння газотурбінних установок, для деяких типів плавильних тиглів тощо. Чавун з кулястою формою графіту, легований 19...25 % Al, очевидно, може бути використаний і як жароміцний матеріал у окремих галузях промисловості.

Висновки по першому розділу, мета і завдання досліджень.

Аналіз складів, структур та властивостей високолегованих алюмінієвих жаростійких чавунів дав можливість зробити наступні висновки:

1. Високолегований алюмінієвий жаростійкий чавун ЧЮ22Ш має високі показники жаростійкості, жароміцності, межі міцності, корозійної стійкості та зносостійкості.

2. Комплекс властивостей алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш мають суттєві переваги в порівнянні з іншими алюмінієвими, хромистими та кремнієвими чавунами.

3. На сьогодні недостатньо використовується потенціал алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш як жаростійкого сплаву замість високолегованих сталей і чавунів, що містять дорогі легуючі елементи хром і нікель.

4. Стабільне отримання виливків із необхідними структурними параметрами та механічними властивостями важко в умовах відсутності відомостей про закономірності кристалізації чавуну та формуванні кулястої форми графіту.

5. Недостатньо досліджені питань з метою прогнозування фазової будови литого чавуну та ступеня сфероїдизації графітних включень;

6. На формування структуроутворення в алюмінієвих чавунах суттєво впливає швидкість охолодження та активності кисню від кількості сфероїдизуючого модифікатора (РЗМ), а параметри структури обумовлюють рівень механічних властивостей.

7. Одним із перспективних напрямків широкого застосування високолегованих алюмінієвих чавунів у промисловості є технологічні рекомендації, щодо сфероїдизуючого модифікування та вибору оптимального варіанту лиття, що забезпечують отримання виливків з високими комплексом механічних характеристик.

Метою роботи є визначення впливу факторів на формування структури та компактної форми графіту виливків з алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш для досягнення найвищого ступеня сфероїдизації графітних включень.

Для реалізації поставленої мети в роботі вирішували наступні задачі:

1. Проаналізувати склад, структурно-фазові перетворення та властивості високолегованих алюмінієвих жаростійких чавунів.

3. Розробити методику дослідження умов утворення компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну з використанням методу вимірювання активності кисню.

4. Запропонувати принципова схема пристрою для вимірювання активності кисню в розплаві чавуну.

5. Вибрати основні методики дослідження, хімічного складу, структури та властивостей ливарних алюмінієвих чавунів.

6. Дослідити структурно-фазові перетворення при кристалізації високолегованого алюмінієвого чавуну.

7. Провести експериментальні дослідження залежності активності кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 від кількості сфероїдизуючого модифікатора (РЗМ), при якій досягається найвищий ступінь сфероїдизації графітних включень.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ, ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ТА СТРУКТУРИ АЛЮМІНІЄВОГО ЧАВУНУ

2.1 Характеристика та плавка алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш

Для дослідження було обрано алюмінієвий чавун марки ЧЮ22Ш, хімічний склад якого наведено в таблиці 2.1 [1].

Таблиця 2.1 – Хімічний склад алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш

Елемент	Вміст елементів, % мас					
	C	Si	Mn	S	P	Al
Масова частка, %	1,6...2,5	1,0...2,0	≤0,8	≤0,03	≤0,2	19,0...25,0

В якості плавильного агрегат використовували індукційну високочастотну тигельну піч ICT-0,06 з основною футеровкою, характеристики якої наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 - Параметри печі ICT-0,06

Параметри	Вхідні параметри	Вихідні параметри
Частота струму, Гц	50	2400
Потужність, кВт	63	50
Напруга, В	380	500
Сила струму, А	100	100

Як шихтові матеріали використовували передільний чавун, сталевий брухт, первинний алюміній марки А7.

У ролі сфероїдизуючого модифікатора використовували РЗМ у вигляді церієвого мішметалу (Σ РЗМ = 98%, Се = 55%) та графітизуючого модифікатора – феросиліцій ФС75.

У лабораторних умовах чавун плавили в печі ICT-0,06 з основним футеруванням. Як матеріали завалки печі використовували чавун і сталевий брухт, які максимально компактним чином укладали в піч. Після розплавлення завалочної шихти рідкий метал перегрівали до температури 1450...1500°C після чого, чавун легували алюмінієм, шляхом введення його невеликими порціями (4...5 прийомом) під дзеркало розплаву. Перед введенням кожної порції алюмінію вимикали піч і додавали алюміній, при цьому порцію алюмінію примусово утримували під дзеркалом металу до повного розчинення, після чого піч включали знову (50% потужності) для гомогенізації розплаву. Таким чином, послідовно вводили всю навіску алюмінію. Після легування розплаву алюмінієм його перегрівали до 1480...1500°C, після чого проводили сфероїдизуючу модифікацію, шляхом присадки в піч 0,10...0,12% мішметалу, потім після нетривалого перемішування чавун при температурі 1480...1500 одночасним проведенням графітизуючого модифікування подачею 0,5% феросиліція ФС75 на струмінь металу.

У виробничих умовах чавун плавили аналогічним чином в індукційній високочастотній печі з магнезитовим футеруванням місткістю 1 т.

2.2 Методика дослідження мікротвердість фазових складових

Вимір мікротвердості проводився на приладі ПМТ-3 «Вимірювання мікротвердості вдавлюванням алмазних наконечників» [28].

При випробуванні на мікротвердість алмазний наконечник, формі правильної чотиригранної піраміди з кутом при вершині 136° вдавлювали у досліджувану ділянку зразка під дією навантаження P , прикладеної протягом певного часу. Після зняття навантаження вимірювали діагоналі відбитка, що залишився на поверхні зразка [28].

Число твердості (H) в кгс/мм² визначали шляхом розподілу навантаження P на умовну площу бічної поверхні отриманого відбитка за формулою:

$$H = \frac{2 \cdot P \cdot \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1,8544 \cdot \frac{P}{d^2}, \quad (2.1)$$

де Р – навантаження на індентор, кгс;

α – кут між протилежними гранями піраміди при вершині, що дорівнює 136°;

d – середня арифметична довжина обох діагоналей відбитка після зняття навантаження, мм.

Певна кількість твердості супроводжується символом Н з індексами, вказаними нижче, вказівка розмірності кгс/мм² опускається у випадках, коли це не викликає неясності. При вимірювання мікротвердості похибка визначення середньої довжини діагоналей відбитка не перевищує $\pm 0,5\%$ вимірюваного значення.

2.3 Мікрорентгеноспектральний аналіз

Мікрорентгеноспектральний аналіз проводили на електронному мікроскопі РЕМ-106 з дворазовим спектром. Метод мікрорентгеноспектрального аналізу використовує збудження характеристичного рентгенівського випромінювання пучком електронів - «електронний зонд». Цей зонд може бути сфокусований, за допомогою електронних лінз до розмірів 0,1...1 мкм, що дозволяє аналізувати склад мікроділянок або елементів мікроструктури сплаву.

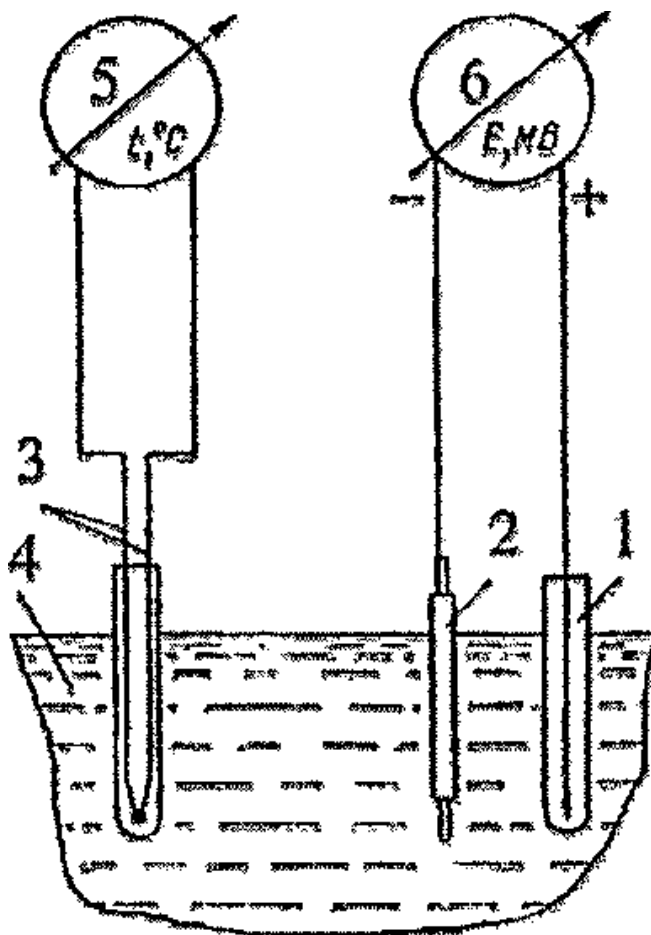
Якісний елементний склад мікрооб'ємів визначали порівнянням досліджуваних та табличних довжин хвиль характеристичного випромінювання. Для кількісного аналізу необхідно знати ще інтенсивність випромінювання найбільш сильної лінії К- або L- серії характеристичного випромінювання дослідного елементу зразка. Завдяки впливу різних факторів при використанні даного методу, важчі елементи в матриці з легших дають занижені значення концентрації. Тому вводили поправку на поглинання, поправку на атомний номер та на флуоресцентне збудження.

2.4 Визначення активності кисню у алюмінієвому розплаві

Активність кисню в чавуні визначалася за допомогою концентраційного кисневого елемента (датчик активності) [23]. Принцип роботи пристрою заснований на явищі виникнення ЕРС у датчику активності.

Електрорушійна сила виникає за рахунок різниці парціальних тисків кисню, в речовинах розділених твердим електролітом, що має за високої температури іонну провідність. Як один з електродів використовувалась суміш порошоків молібдену та окису молібдену з постійним парціальним тиском кисню.

Другим електродом був метал. Різниця парціальних тисків кисню і величина електрорушійної сили визначається активністю кисню в металі. На рисунку 2.1 представлена принципова схема датчика окиснення чавуну.



1 – датчик окисненості з електролітом $ZrO_2 \cdot Y_2O_3$ та електродом порівняння $Mo+MoO_2$; 2 - струмознімач; 3 – термопара; 4 – розплав;

Рисунок 2.1 – Принципова схема пристрою для вимірювання активності кисню

Зв'язок між активністю кисню в металі та величиною ЕРС має вигляд:

$$\lg \alpha_o = 2,685 - \frac{10,087 \cdot E + 5661}{T} \quad (2.2)$$

де α_o - активність кисню в розплаві, % за масою;

E – ЕРС, мВ;

T – температура розплаву, K .

2.5 Термічний аналіз

Термічний аналіз проводився шляхом зняття кривої охолодження розплаву за допомогою вольфрам-ренієвої термопари діаметром 0,5мм і вторинного приладу (потенціометра). Реєстрований сигнал у мілівольтах переводили в градуси Цельсія. Отримані дані оброблялися за допомогою математичної програми Microsoft Excel.

За отриманими кривими охолодження визначалися температури початку кристалізації (t_l), температура евтектичної реакції ($t_{ЕВТ}$) і температура закінчення етапу кристалізації (t_c). Похибка вимірювання становила $\pm 5^\circ C$.

Виливки та зразки термічно обробляли в електричній муфельній печі СНОЛ-1,6.2,3.0,8/9-М1 з точністю підтримання температури $\pm 5^\circ C$. В якості термічної обробки застосовували відпал для зняття напружень та поліпшення оброблюваності виливків. Зразки відпалювали при температурі 780 С протягом 8 годин при подальшому охолодженні з піччю.

2.6 Металографічні дослідження алюмінієвого чавуну

Металографічні дослідження проводили на мікроскопі МИМ-8 з цифровою фіксацією зображення при різних збільшеннях у відбитому світлі при збільшеннях 100 та 200 разів (рис. 2.2). Оцінку отриманої структури для алюмінієвого чавуну проводили за ГОСТ 3443-87.



Рисунок 2.2 – Загальний вид металографічного мікроскопу МІМ-8

Для виявлення мікроструктури зразки механічно обробляли до чистоти $Ra \leq 1,6$ мкм і протравлювали в 4% спиртовим розчином HNO_3 (ГОСТ 4461-77). Підготовка шліфів для металографічних досліджень проводили на шліфувально-полірувальному верстаті із застосуванням абразивного матеріалу - алмазної пасті. Визначення розмірів структурних складових визначали методом випадкових січень. Статистичну обробку отриманих експериментальних даних виробляли за допомогою стандартного пакета Microsoft Office Excel.

Об'ємну частку графітних включень визначали на нетравлених мікрошліфах шляхом фотографування мікроструктури зразка за допомогою цифрової камери окуляра. Отримані зображення аналізували в програмі для обробки та обчислення компонентів відеозображень, в ній за допомогою світлофільтрів робили захоплення необхідної фазової складової (в даному випадку графіту) після чого автоматично проводили розрахунок об'ємної частки графіту.

Аналогічним чином на травлених мікрошліфах (склад травника: 40% гліцерину, 40% HF та 20% HNO_3) визначали об'ємну частку карбідної фази Fe_3AlC_x (ϵ -фази) [2]. Похибка розрахунків програми пов'язана з можливими недоліками вихідного зображення.

Висновки до другого розділу

1. Розроблено методику дослідження умов утворення компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну з використанням методу вимірювання активності кисню.
2. Запропоновано принципову схему пристрою для вимірювання активності кисню в розплаві чавуну.
3. Запропоновано методика проведення металографічних досліджень мікроструктури алюмінієвого чавуну, вибрані основні методики дослідження, хімічного складу та властивостей ливарних алюмінієвих чавунів.

РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНО-ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ ТА ФОРМУВАННЯ КОМПАКТНОЇ ФОРМИ ГРАФІТУ У ВИЛИВКАХ З АЛЮМІНІЄВОГО ЧАВУНУ

3.1 Формування структури в алюмінієвому чавуні ЧЮ22Ш

Формування структури чавуну вивчали з урахуванням результатів про те, які фази, в якій послідовності, в яких поєднаннях і при яких температурах виділяються при переході високолегованого чавуну з рідкого стану в твердий.

Формування структури чавуну вивчали з урахуванням результатів експериментальних досліджень кривих охолодження чавуну ЧЮ22Ш представлено на рисунку 3.1.

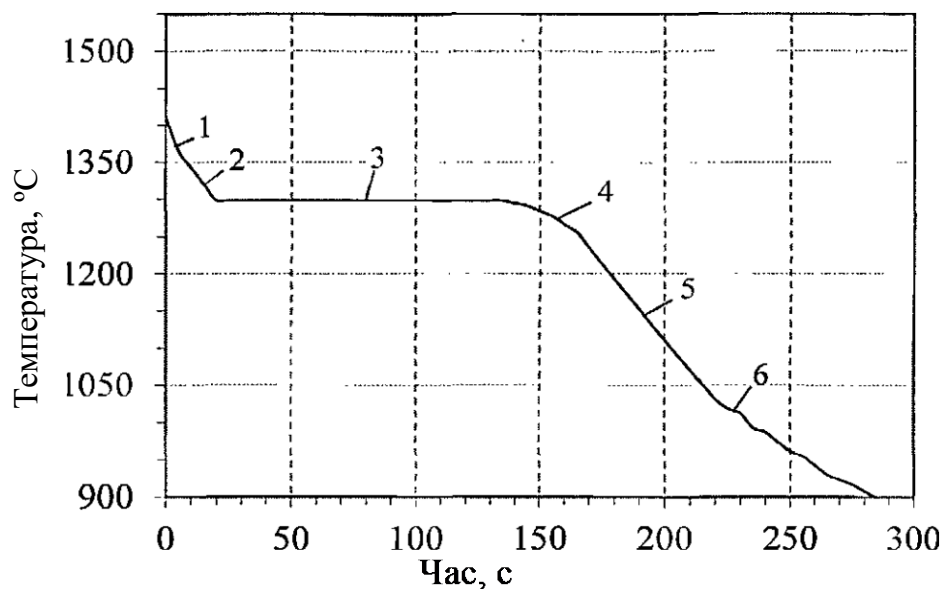


Рисунок 3.1 – Криві охолодження чавуну ЧЮ22Ш

Крива охолодження, перш за все, вказує на те, що чавун переважно кристалізується при постійній температурі, але зазнає незначної доєвтектичної та заєвтектичної кристалізації. На температурно-часовій кривій можна виділити області охолодження рідкого чавуну 1, доєвтектичної кристалізації первинного

графіту 2, евтектичної кристалізації 3, заевтектичної кристалізації фериту (α – фази) 4, охолодження твердого чавун 5 і виділення з перенасиченого твердого розчину (α – фази) алюмінію, що містить карбідну фазу 6.

Велика довжина горизонтальної ділянки на кривій охолодження свідчить про розвиток евтектичної кристалізації та утворення виливки відповідної структури. Відповідно до кривих охолодження і політермічних розрізів, в чавуні ЧЮ22 повинні бути присутніми три структурні компоненти: включення первинного графіту (I), графіт-феритової евтектики (II) і вторинний карбід Al_4C_3 (III), що виділяється після евтектичної кристалізації. Однак реальна типова мікроструктура чавуну (рис. 3.2) відрізняється від представленої.

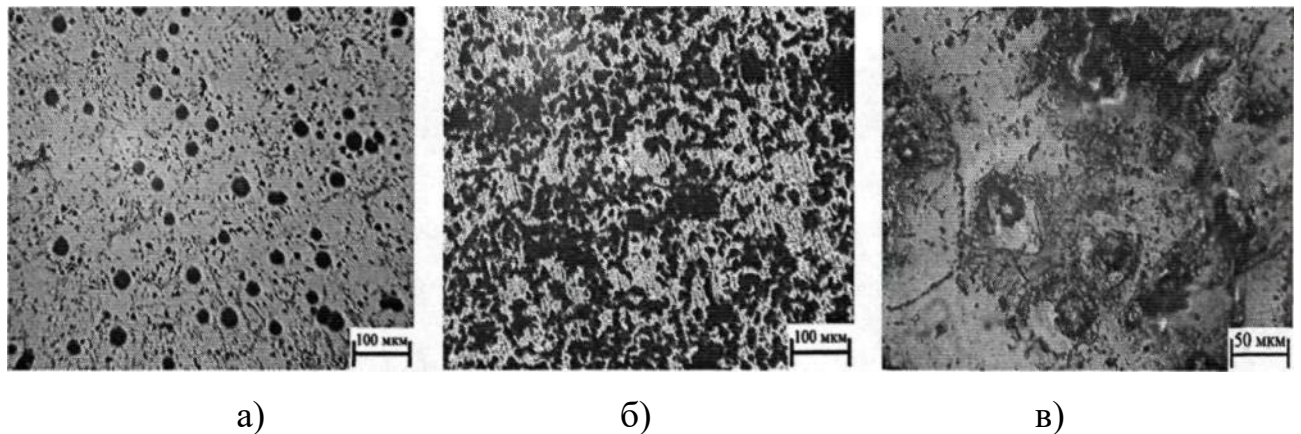


Рисунок 3.2 – Структура алюмінієвого чавуну з кулястою формою графіту ЧЮ22Ш: а – до травлення та б, в – після травлення

На мікроструктурі нетравленого мікрошліфу (рис. 3.2 а), можна бачити виділені темні включення сферичного графіту, що рівномірно розподілені в металевій матриці. А в самій матриці виділяється основна світла фаза і лінії вкраплень темного кольору. На травлених мікрошліфах, при невеликих збільшеннях (рис. 3.2 б) можна бачити світлу і темну фази. При збільшенні в центрі темної фази проглядаються включення графіту, що розташоване на білому фоні навколо відгороджених темних стрічковатих включень своєрідної форми (рис. 3.2, в).

Світлу і темну фази попередньо ідентифікували шляхом вимірювання їх мікротвердості і порівняння отриманих значень з літературними даними.

Мікротвердість світлої фази становить 418 HV, що відповідає мікротвердості легovanого алюмінієм фериту (α - фази). Більш темна кристалічна фаза має мікротвердість 653 HV, тому її ідентифікували як карбід заліза-алюміній Fe_3AlC_x (ϵ - фаза), мікротвердість якого знаходиться в межах 680...760 HV [2].

Фазовий склад додатково вивчали на електронному мікроскопі РЕМ-106 з мікроаналізатором, рисунок 3.3, 3.4.

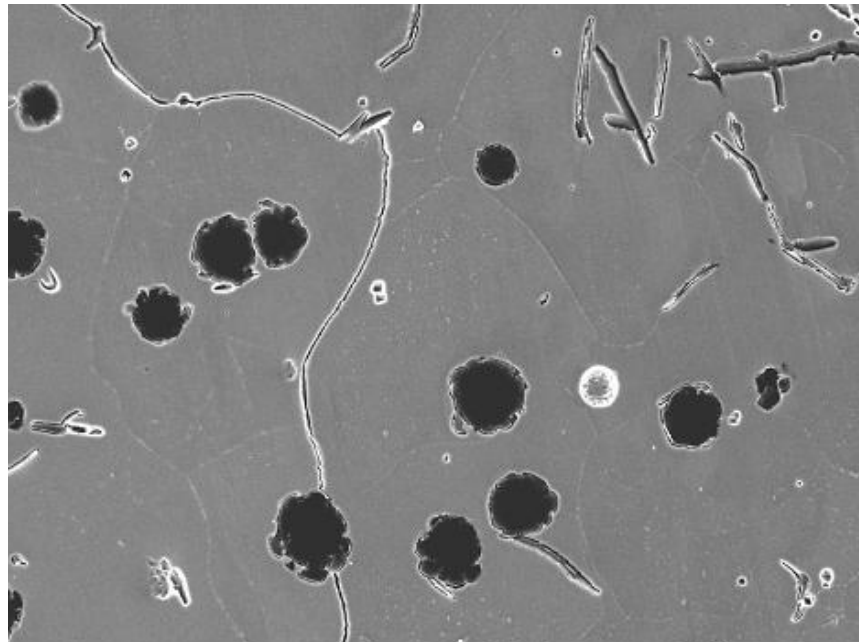
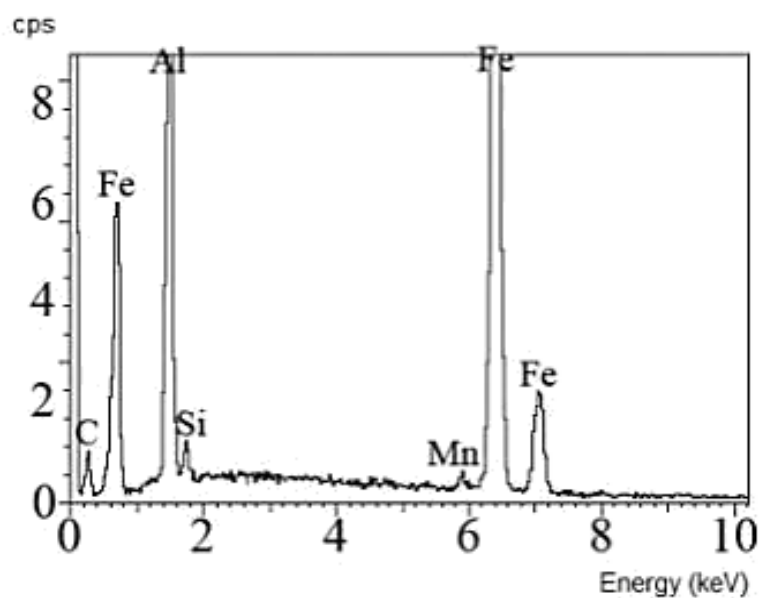
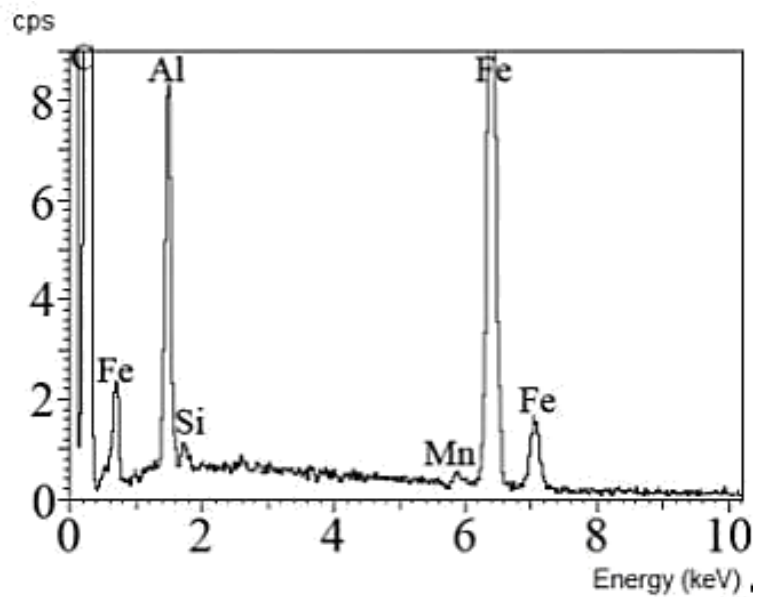


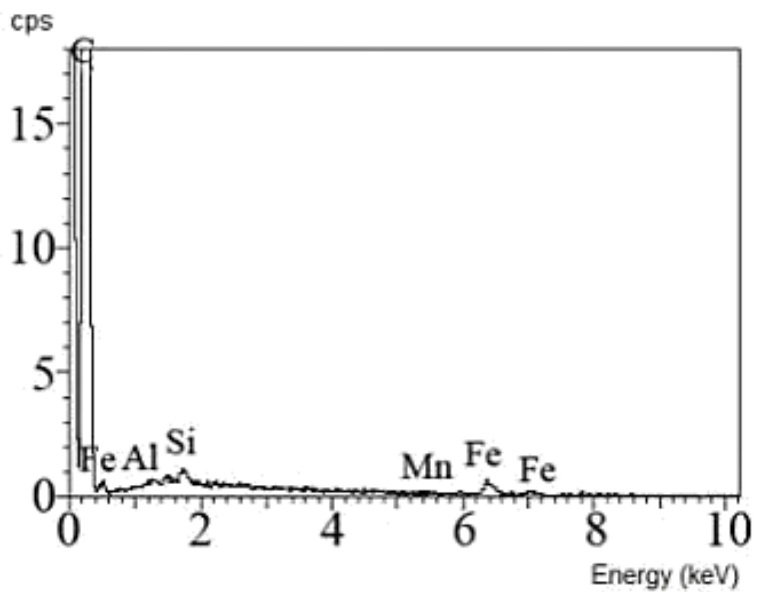
Рисунок 3.3 – Мікроструктура алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш



a)



б)



в)

Рисунок 3.4 – Результати мікрорентгеноспектрального аналізу фаз в алюмінієвому чавуні з кулястою формою графіту ЧЮ22Ш

Кількісний аналіз підтверджує, що матриця (рис. 3.4 а) – є феритом, легованим алюмінієм до 23% (α - фаза), а темні включення округлої форми (рис. 3.4 в) – графіт. Дані стрічкових включень (рис. 3.4 б) вказують на вміст заліза, алюмінію та вуглецю, тому можна припустити, що це карбіди залізо-алюмінію, але більш за все, це карбіди заліза з алюмінієм змінного складу типу Fe_yAlC_x , де $y = 1,3:1,6$.

Таким чином, фактична структура чавуну відрізняється від передбачуваної наступними параметрами: по-перше, однозначно визначити виділення первинного графіту неможливо, крім того, в чавуні замість очікуваного карбіду Al_4C_3 утворюється карбід заліза алюмінію, близький за складом до $Fe_{1,5}AlC_x$. Можливо, в умовах високого переохолодження термодинамічно вигідніше замість подвійного карбіду Al_4C_3 утворювати потрібний карбід, і навіть не Fe_3AlC_x (ϵ - фаза), а $Fe_{1,5}AlC_x$. Можна припустити, що при збільшенні вмісту кремнію від 1 до 2 % можливе виділення карбіду заліза-алюмінію з потрібної евтектики.

Таким чином, проведені дослідження суттєво доповнюють наші знання про закономірності кристалізації високолегованого алюмінієвого чавуну та формування його структури.

3.2 Особливість формування компактної форми графітних включень у виливках з алюмінієвого чавуну

Стійке отримання графіту заданої форми є однією з найважливіших проблем виробництва виливків з високоміцного чавуну. Значне відхилення литої структури виливків зазвичай пов'язане з коливаннями хімічного складу чавуну, неоднаковим станом сфероїдизуючих добавок, ослабленням модифікуючої дії з часом та іншими факторами [11-22]. У зв'язку з цим актуальним завданням є розробка методів управління ступеня сфероїдизації модифікації чавуну та прогнозування форми графіту в литій структурі чавуну.

На етапі перебування рідкого модифікованого чавуну в печі, ковші чи формі, можна передбачити форму його включень графіту двома методами. Обидва методи засновані на вимірюванні ЕРС, що створюється в активометрах з твердим електролітом. Для контролю вмісту магнію в чавуні розроблено високотемпературний гальванічний елемент з твердим електролітом на основі MgO з електродом порівняння зі стандартного сплаву $Cu+Mg$ ($N_{Mg}=0,205$). Оскільки при модифікуванні високолегованого алюмінієвого чавуну магнієм

змінити форму графіту неможливо, тому для оцінки ступеня сфероїдизації алюмінієвого чавуну краще використовувати другий, більш універсальний метод вимірювання активності кисню.

Метод вимірювання активності кисню заснований на тому, що будь-який сфероїдизатор (Mg, PЗМ та ін.) є сильним розкислювачем і активність кисню в розплавленому чавуні визначається активністю розчиненого в ньому сфероїдизатора. Так, згідно з [12], для розкислення чавуну за реакцією $[Mg] + [O] \rightarrow (MgO)$ константа рівноваги дорівнює:

$$K_p = a_{MgO} / (a_O \cdot a_{Mg}) = a_{MgO} / (f_O \cdot [\%O] \cdot f_{Mg} \cdot [\%Mg]), \quad (3.1)$$

a_{MgO} – активність оксиду магнію,

a_O , f_O і $[\%O]$ відповідно активність, коефіцієнт активності і концентрація розчиненого кисню,

a_{Mg} , f_{Mg} і $[\%Mg]$ – активність, коефіцієнт активності та концентрація розчиненого магнію відповідно.

З виразу (3.1) для константи рівноваги (K_p) випливає, що активність кисню в чавуні обернено пропорційна активності магнію, а саме, чим вищий рівень - магнію в розплаві, тим меншою має бути активність кисню. Отже, визначивши величину a_O , можна передбачити вміст у чавуні сфероїдного шлаку (хімічно незв'язаного) і, відповідно, форму графіту у виливку.

Активність кисню в чавуні вимірювали за допомогою високотемпературного гальванічного елемента з твердим електролітом складу ZnO_2 (0,83) - Y_2O_3 (0,17) і електродом порівняння $Mo-MoO_2$ [1, 2, 12-19].

Зазначимо, що основною особливістю розкислення чавунів порівняно зі сталлю є значно нижчий рівень розчиненого кисню за рахунок високої концентрації в сплавах вуглецю та кремнію в діапазоні 2,5...4,0% та 1,0...3,0% відповідно, а також більш низькою, на 150...250°C, робочої температури. Крім того, добавки алюмінію в Fe-C-Si сплави (3,6 %C і 1,8% Si) при 1420°C в кількості до 0,05% призводять до різкого зниження активності кисню до значень порядку $(0,8...1,0) \cdot 10^{-4}$. Подальше збільшення додавання алюмінію з 0,05 до 0,20% впливає на a_O менш ефективно, знижуючи його до $(4,0...6,0) \cdot 10^{-5}$ [25].

У присутності кремнію в Fe-C-Si сплавах, що містять 3,6% С, спостерігається значне зниження активності кисню. Експериментальні значення близькі до розрахованих для реакції $[\text{Si}] + 2[\text{O}] \rightarrow (\text{Si}_2)_\text{T}$ в інтервалі температур 1360...1420°C. У цих сплавах, близьких за вмістом вуглецю і кремнію до промислових сірих і високоміцних чавунів, активність кисню має порядок значень $(1,5...4,0) \cdot 10^{-4}$.

Обробка розплаву фероцерієм знижує активність кисню в залізовуглецевих сплавах. Однак у присутності сірки на активність кисню ефективно впливають лише невеликі його добавки. Це вказує на те, що при додаванні до сплавів Fe-C-Si-S церій в невеликих кількостях діє як розкислювач, а при збільшенні добавки паралельно починаються реакції розкислення та десульфурації [12-19]. При цьому кінцева концентрація сірки зменшується з 0,04 до 0,02%.

Таким чином, вимірюючи активність кисню в ЧЮ22, можна оцінити його стан після сфероїдизуючої модифікації, що особливо важливо при отриманні великої кількості чавуну для заливання великих виливків.

3.3 Вплив активності кисню на формування компактної форми графітних включень у виливках з алюмінієвого чавуну

У чавуні, кисень завжди присутній у розчиненому та у зв'язаному в оксиди стані. В залежності від стану, в якому кисень знаходиться у розплаві він по різному впливає на структуру та властивості чавуну та дуже суперечливі. Кисень в розчиненому стані дезактивує підкладки (потенційні центри кристалізації) чавуну та підвищує його схильність до відбілу. З іншого боку, хімічно пов'язана частина кисню у вигляді неметалевих включень може сприяти графітізації чавуну та виконувати роль підкладок.

Вміст кисню в чавуні залежить від складу шихти, типу плавильного агрегату, ступеня модифікування та присутність в розплаві розкислюючих елементів. Перехід кисню з розчиненого стану до форми хімічно з'єднання, в

процесі охолодження рідкого чавуну, сприяє зменшенню вмісту розчиненого кисню. Слід зазначити, що основну роль оцінки впливу кисню при графітизуючому модифікуванні відіграє надрівноважно розчинена його частина.

З усіх присутніх елементів, на активність кисню в чавуні ЧЮ22, найбільш впливає Al, що має більш високу спорідненість до кисню, а в сірому чавуні основними розкислювачами є вуглець та кремній.

Теоретичну оцінку впливу алюмінію Al на активність кисню в ЧЮ22, хімічний склад якого: C – 2,1%; Si – 1,5%; Mn – 0,8%; S – 0,02%; P – 0,1%, Al – 35%, виконували за допомогою термодинамічного розрахунку, визначальною реакцією для якого є:



Константа термодинамічної рівноваги для даної реакції (3.1) розраховували за наступною формулою:

$$\lg K_{Al_2O_3} = \frac{64900}{T} - 29,63 \quad (3.2)$$

Тоді, константа рівноваги для визначальної реакції (3.1) матиме наступний вигляд:

$$\lg K_{Al_2O_3} = \frac{a_{Al_2O_3}}{a_{Al}^2 \cdot a_O^3} \quad (3.3)$$

Оскільки у сплавах на основі заліза, при високому вмісті алюмінію, продуктом визначальної реакції (3.1) є практично чистий оксид алюмінію Al_2O_3 , то його активність приймаємо за одиницю $a_{Al_2O_3} = 1$, яка пов'язана з його концентрацією в рідкому чавуні наступним співвідношенням:

$$a_{Al} = f_{Al} \cdot [\%Al] \quad (3.4)$$

де f_{Al} і $[\%Al]$ – відповідно, коефіцієнт активності та концентрація алюмінію в рідкому чавуні.

Врахувавши рівняння (3.3) та (3.4) з рівняння (3.2) впливає:

$$K_{Al_2O_3} = \frac{1}{[f_{Al} \cdot [\%Al]]^2 \cdot (a_O)^3} \quad (3.5)$$

Прологарифмувавши рівняння (3.5), маємо:

$$\lg K_{Al_2O_3} = -2 \cdot \lg f_{Al} - 2 \cdot \lg [\%Al] - 3 \cdot \lg a_O \quad (3.6)$$

Для розрахунку активності кисню в рідкому чавуні, шукане співвідношення виходить з рівняння (3.6):

$$\lg a_{O,Al} = 1/3(-\lg K_{Al_2O_3} - 2 \cdot \lg f_{Al} - 2 \cdot \lg [\%Al]) \quad (3.7)$$

Співвідношення (3.7), розраховували використовуючи розраховані значення $\lg K_{Al_2O_3}$ та обчислюючи величини $\lg [\%Al]$ за заданою або фактичною концентрацією алюмінію. Значення $\lg f_{Al}$ визначали за параметрами взаємодії першого та другого порядку e_{Al}^j і r_{Al}^j [19] для компонентів чавуну j – C, Si, Mn, P, S, Al:

$$\begin{aligned} \lg f_{Al} &= \sum e_{Al}^j \cdot [\%J] + \sum r_{Al}^j \cdot [\%J]^2 \\ \lg f_{Al} &= e_{Al}^C \cdot [\%C] + e_{Al}^{Si} \cdot [\%Si] + e_{Al}^{Mn} \cdot [\%Mn] + e_{Al}^P \cdot [\%P] + \\ &+ e_{Al}^S \cdot [\%S] + r_{Al}^C \cdot [\%C]^2 + r_{Al}^{Si} \cdot [\%Si]^2 + r_{Al}^{Al} \cdot [\%Al]^2. \end{aligned} \quad (3.8)$$

Таблиця 3.1 – Значення параметрів взаємозв'язку першого порядку e_{Al}^j при температурі 1873 К

Параметри взаємодії	e_{Al}^C	e_{Al}^{Si}	e_{Al}^{Mn}	e_{Al}^P	e_{Al}^S	e_{Al}^{Al}
Значення параметрів e_{Al}^j	0,0034	0,0056	-	-	0,03	0,045

Таблиця 3.2 - Значення параметрів взаємодії другого порядку r_{Al}^j при температурі 1873 К

Параметри взаємодії	r_{Al}^C	r_{Al}^{Si}	r_{Al}^{Mn}	r_{Al}^P	r_{Al}^S	r_{Al}^{Al}
Значення параметрів r_{Al}^j	-0,004	-0,0006	-	-	-	-0,001

Підставивши значень параметрів взаємодії першого та другого порядків у вираз (3.8) будемо мати:

$$\begin{aligned} \lg f_{Al} &= 0,0034 \cdot [2,05] + 0,0056 \cdot [1,5] + 0,03 \cdot [0,02] + 0,045 \cdot [\%Al] + \\ &+ (-0,004) \cdot [2,05]^2 + (-0,0006) \cdot [1,5]^2 + (-0,001) \cdot [\%Al]^2. \end{aligned} \quad (3.9)$$

Слід зазначити, що параметри взаємодії залежить від температури, тому вплив температури для параметрів взаємодії першого порядку e_i^j враховували за формулою:

$$e_i^j(T) = e_i^j(1873) \cdot \left(\frac{1873}{T} \right) \quad (3.10)$$

Для параметрів другого порядку приймаємо такі ж самі співвідношення:

$$\lg f_{Al}(T) = \lg f_{Al}(1873) \cdot \left(\frac{1873}{T} \right) \quad (3.11)$$

Підставивши у вираз (3.7) значення $\lg K_{Al_2O_3}$ та $\lg f_{Al}(T)$ визначили значення $\lg a_O$ і потім - шуканої активності кисню a_O в рідкому чавуні ЧЮ22.

За результатами термодинамічного розрахунку отримали залежності активності кисню від концентрації алюмінію Al (рис. 3.5).

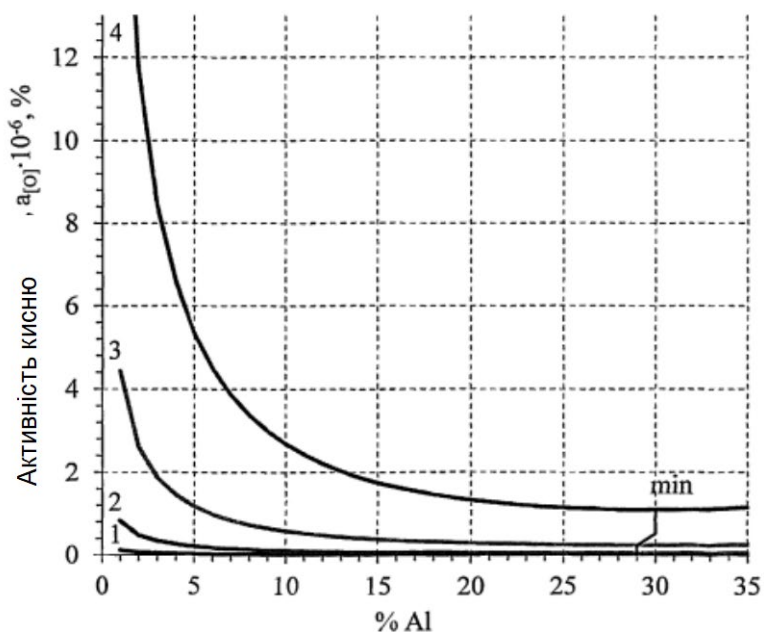


Рисунок 3.5 – Залежність активності кисню від вмісту алюмінію при температурах 1 – 1576 К, 2 – 1673 К, 3 – 1773 К та 4 – 1873 К

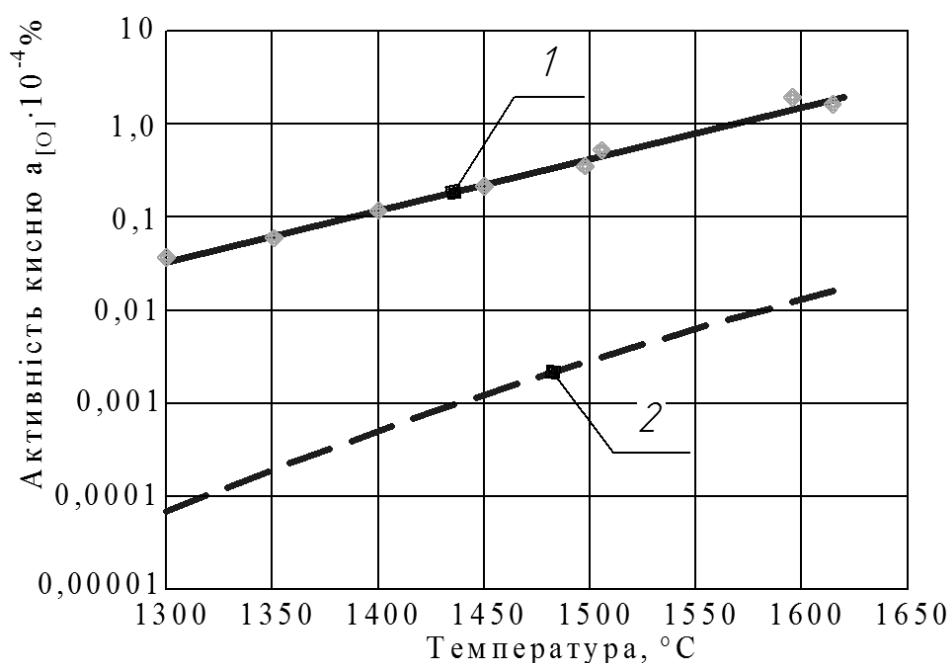
З розрахункових даних рисунка 3.5, можна бачити, що активність кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 зростає зі збільшенням температури.

Результати експериментальних даних впливу температури на активність кисню в алюмінієвому чавуні (табл. 3.3) підтверджують розрахункові дані.

Таблиця 3.3 – Результати експериментальних даних активності кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22

Температура, °C	E, мВ	$a_o \cdot 10^{-4}$
1352,00	712,00	0,0608
1397,00	697,00	0,1249
1452,50	715,00	0,1714
1482,00	670,00	0,3999
1518,00	687,00	0,4358
1591,00	668,00	1,1485
1618,00	641,00	1,9115

За результатами експериментальних даних та теоретичних розрахунків активності кисню в алюмінієвому чавуні побудували залежність впливу температури на активність кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 рисунок 3.6.



1 – експериментальна крива; 2 – розрахункова крива за реакції

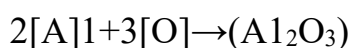


Рисунок 3.6 – Залежність впливу температури на активність кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22

При порівнянні розрахункових даних з експериментальними результатами (рис. 3.6) можна бачити, що експериментальні значення активності кисню в чавуні ЧЮ22 відрізняються від розрахункових більш, ніж на два порядки. Зазначимо, що для отримання кулястої форми графіту у високолегованому алюмінієвому чавуні ЧЮ22 застосовують добавки РЗМ. Рекомендовано кількість модифікатора, для отримання повністю кулястої форми графіту в чавуні з вмістом алюмінію 19...25%: фероцерію – 0,25...0,35% (Се – 91,8%) або фероцерію – 0,2% і силікокальцію – 0,4...0,6%. Повністю кулясту форму графіту в алюмінієвому чавуні отримували при введенні 0,3% фероцерію з добавкою 0,5% феросиліцію.

Якщо ступінь засвоєння модифікатора становить 50%, то для отримання графіту кулястої форми в розплаві сірого чавуну необхідно ввести 0,3...0,4% фероцерію. Слід зазначити, що для виробництва виливків з церієвого чавуну з кулястою формою графіту розплав, як правило, обробляється 0,3...0,6% фероцерію або ФЦМ-5, кількість яких визначається вмістом сірки у вихідному чавуні, та іншими технологічними факторами.

Оскільки при введенні сфероїдизуючих модифікаторів в розплав, вони частково витрачаються на його розкислення, тому припускаємо, що для отримання кулястої форми графіту в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 потрібно меншу кількість РЗМ, ніж для сірого чавуну, оскільки в ЧЮ22 активність кисню на два порядки нижче ніж у СЧ.

За результатами експериментальних даних встановлено залежність активності кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 від кількості сфероїдизуючого модифікатора (РЗМ), що представлена на рисунку 3.7 та наведена мікроструктура (рис. 3.8).

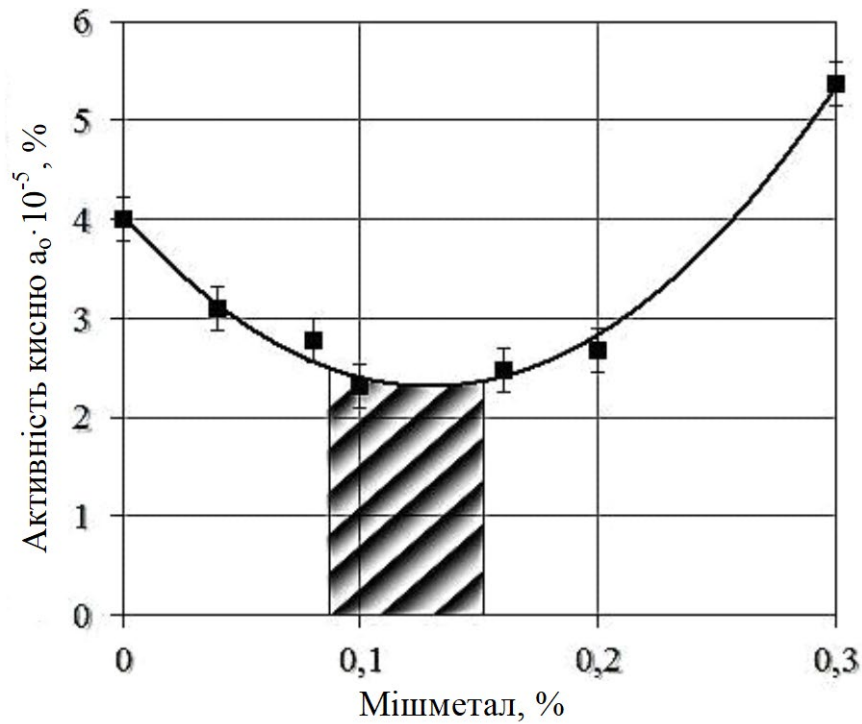


Рисунок 3.7 – Вплив РЗМ на активність кисню алюмінієвого чавуну ЧЮ22

З рисунку 3.7 можна бачити, що активність кисню в алюмінієвому чавуні зі збільшенням витрати РЗМ змінюється за екстремальною залежністю, яка описується степневим рівнянням $a_o = 103,39 R^2 - 26,74 M + 4,042$, $R^2 = 0,9884$, де M – витрата мішметалу, %.

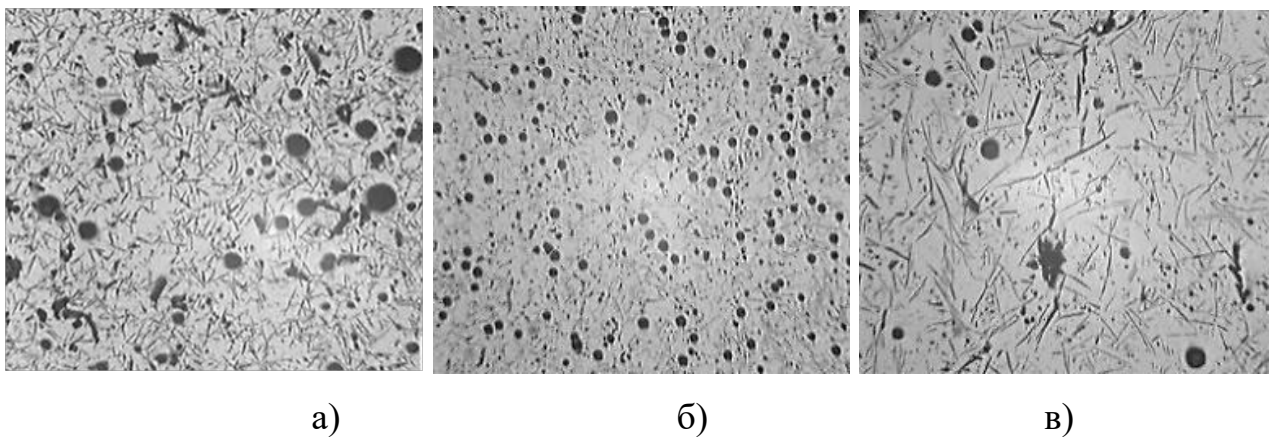


Рисунок 3.8 – Мікроструктура графітових включень в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 з різним вмістом РЗМ: а) – до 0,08 %; б) – 0,08...0,16%; в) – більше 0,16%

З аналізу мікроструктур графітових включень видно, що максимальна кількість кулястого графіту формується в області мінімуму активності кисню при витраті РЗМ в інтервалі 0,08...0,16% (рис. 3.8 б)

Таким чином, виконані дослідження дозволили виявити низьку окисленість розплаву ЧЮ22, встановити закономірності зміни в ньому активності кисню при введенні РЗМ і визначити оптимальні його витрати, при якому досягається найвищий ступінь сфероїдизації графітних включень.

Висновки до третього розділу

1. Дослідження формування структури чавуну ЧЮ22Ш за його кривими охолодження, показали, що чавун переважно кристалізується при постійній температурі, але зазнає незначної доєвтектичної та заєвтектичної кристалізації.

2. Результати мікрорентгеноспектрального аналізу фазового складу алюмінієвого чавуну з кулястою формою графіту ЧЮ22Ш виявили утворення карбід заліза алюмінію, що близький за складом до $Fe_{1,5}AlC_x$.

3. Показано, що вимірюючи активність кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22, можна оцінити його стан після сфероїдизуючої модифікації.

4. За результатами експериментальних даних та теоретичних розрахунків активності кисню в алюмінієвому чавуні побудували залежність впливу температури на активність кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22.

5. За результатами експериментальних даних встановлено залежність активності кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 від кількості сфероїдизуючого модифікатора (РЗМ) та визначили оптимальні його витрати, при яких досягається найвищий ступінь сфероїдизації графітних включень.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Аналіз складів, структур та властивостей високолегованих алюмінієвих жаростійких чавунів дав, свідчить, що чавун ЧЮ22Ш має високі показники жаростійкості, жароміцності, межі міцності, корозійної стійкості та зносостійкості. Показано, суттєві переваги комплексу властивостей алюмінієвого чавуну ЧЮ22Ш в порівнянні з іншими алюмінієвими, хромистими та кремнієвими чавунами.

Показано, що одним із перспективних напрямків широкого застосування високолегованих алюмінієвих чавунів у промисловості є технологічні рекомендації, щодо сфероїдизуючого модифікування та вибору оптимального варіанту лиття, що забезпечують отримання виливків з високими комплексом механічних характеристик.

Розроблено методику дослідження умов утворення компактної форми графіту у виливках з алюмінієвого чавуну з використанням методу вимірювання активності кисню та запропоновано принципову схему пристрою для вимірювання активності кисню в розплаві чавуну.

Досліджено формування структури чавуну ЧЮ22Ш за його кривими охолодження, показано, що чавун переважно кристалізується при постійній температурі, але зазнає незначної доєвтектичної та заєвтектичної кристалізації. Мікрорентгеноспектральним аналізом фазового складу чавуну ЧЮ22Ш виявлено утворення карбід заліза алюмінію, що близький за складом до $\text{Fe}_{1,5}\text{AlC}_x$.

Показано, що вимірюючи активність кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22, можна оцінити його стан після сфероїдизуючої модифікації. Встановлено залежність активності кисню в алюмінієвому чавуні ЧЮ22 від кількості сфероїдизуючого модифікатора (РЗМ) та визначили оптимальні його витрати, при яких досягається найвищий ступінь сфероїдизації графітних включень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Справочник по чугуному литью. Под ред. Н. Г. Гиршовича. - Л.: Машиностроение. 1978, - 758 с.
2. Sigworth G. K. Elliot J. F. // Metal science Journal. - 1974. V. 8. № 9 . - P. 298-310.
3. Сабирзянов Т.Г. // Известия АН СССР. Металлы. - 1960. - № 1, - С.181-186.
4. Buzek Z. // Hutnicke listy. - 1984. T. 39. - № 11, - S.764-769
5. Sigworth G. K. Elliot J. F. // Metal science Journal. - 1974. V. 8. № 9 . - P. 298-310.
7. Горшков А.А., Затуловский С.С., Руденко Н.Г. и др. Чугун с шаровидным графитом, обработанный редкоземельными модификаторами. - Киев: Наукова думка. 1964, - 164 с.
8. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко, П. А. Вареник П.А. — К. : Наукова думка, 1986. — с. 248.
9. Иванов В. Г. Вплив кремнію на графітизацію заевтектичного синтетичного чавуну. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2017. № 1. С. 17 – 22.
10. Иванов В. Г. Вплив умов плавки та газонасиченості на формоутворення 303 графіту в чавунах. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. 2018. № 1. С. 16 – 20.
11. Иванов В. Г. Особенности формообразования графита в синтетическом чугуны под час плавки у вакуумі. Металургія. 2017. Вип. 1 (37). С. 11 – 16.
12. Иванов В. Г. Роль кисню при формоутворенні графіту в чавунах. Металургія. 2018. Вип. 1 (39). С. 34 – 40.
13. Иванов В. Г., Пірожкова В. П., Луньов В. В. Вплив сірки на морфологію графіту в чавунах. Металургія. 2017 Вип. 2 (38). С. 14 – 19.
14. Иванов В. Г., Пірожкова В. П. Будова графітових вкраплень у високоміцних чавунах. Нові матеріали і технології в машинобудуванні:

матеріали VIII наук.-техн. конф., 30 - 31 травня 2016 р. Київ: Вид-во НТТУ —КПІ, 2016. С. 60 – 61.

15. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко, П. А. Вареник. Киев : Наукова думка, 1986. 248 с.

16. Itofuji H. Study of voids in chilled samples of magnesium treated irons International Journal of Cast Metals Research. 2004. Vol. 17, №. 4. P. 220-228

17. Могилев В. К., Лев О. И. Справочник литейщика. – М.: Машиностроение, 1988. – 271 с.

18. Москалев І. Н. Ливарні сплави та їх плавка: Навчальний посібник. – К.: НМКВО, 1993. – 368с.

19. Сабірзянов Т.Г.Теплотехніка ливарних процесів / Т.Г. Сабірзянов, В.М. Кропівний. – Кіровоград: КНТУ, 2005. – 402 с.

20. Лакеев А.С., Щегловитов Л.А., Кузьмин Ю.Д. Прогрессивные способы изготовления точных отливок : Киев: Техніка, 1984. – 160 с

21. ДСТУ 3925-99. Чавун з кулястим графітом для виливків. Технічні умови. [Текст]: - К.: Держстандарт України, 2000.– 13 с.

22. Кудрин В. А. Внепечная обработка чугуна и стали. – М.: Металлургия, 1992. – 336 с.

23. Лузгин В.П., Зинковский И.В., Подкидышев В.В., Иванов А.А. Кислородные зонды в сталеплавильном производстве. – М.: Металлургия. 1989, - 144 с

24. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э. В. Захарченко, Ю. Н. Левченко, В. Г. Горенко, П. А. Вареник П.А. — К. : Наукова думка, 1986. — с. 248.

25. Худокормов Д.Н., Вишкарёв А.Ф., Лекаш С.Н., Розум В.А., Зинковский И.В., Бестужев Н.И. / Раскисление алюминием, магнием и церием высокоуглеродистых сплавов железа. // Изв. Вуз. Черная металлургия. — 1985. - №11, - С.25-28.