

**Міністерство освіти і науки України**  
**Луцький національний технічний університет**  
**Факультет митної справи, матеріалів та технологій**  
**Кафедра матеріалознавства**

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**Оптимізація структури чавуну ВЧ 50 під гаряче  
штампування / The structure of the cast iron EN-GJS-500-7  
for hot die forming of optimization**

спеціальності 132 "Матеріалознавство"  
освітня програма "Матеріалознавство"

Виконав: здобувач вищої освіти  
групи ПММ-21  
**Александр Назарій  
Володимирович**

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник:  
к.т.н., доцент  
Гусачук Дмитро Анатолійович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Кваліфікаційну роботу  
допущено до захисту  
«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2024 р.  
к.т.н., доцент  
Гарант освітньої програми:  
Мельничук Микола Дмитрович

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Луцьк – 2024 року

# ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет митної справи, матеріалів та технологій  
Кафедра матеріалознавства  
Ступінь вищої освіти: магістр  
Галузь знань: 13 Механічна інженерія  
Спеціальність: 132 Матеріалознавство  
Освітня програма: Матеріалознавство

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Мельничук М.Д.

“\_\_\_” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

## З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

*Александрюку Назарію Володимировичу*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи *Оптимізація структури чавуну ВЧ 50 під гаряче штампування*

керівник роботи *Гусачук Дмитро Анатолійович, к.т.н., доцент*,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “23” 10 2024 року №02 407/01-

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи «03» 12 \_\_\_\_\_ 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи *Зразки матеріалу (вилівки чавуну ВЧ50), технологія литва, технічні умови, стандарти*

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ; отримання та застосування високоміцних чавунів у промисловості; опис методики досліджень; вивчення структури та властивостей виливків чавуну; дослідження впливу графітизації на структуру виливків; дослідження пластичної деформації чавуну ВЧ50; висновки та практичні рекомендації*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) *1 слайд – застосування високоміцних чавунів у промисловості; 2, 3 слайди – методика експериментальних досліджень; 4, 5 слайди – структура та властивості виливків чавуну; 6,7 слайди – вплив графітизації на структуру виливків чавуну; 8, 9 слайди – результати досліджень пластичної деформації чавуну; 10 слайд – основні висновки.*

## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Нормокон- троль</i>	<i>доцент кафедри матеріалознавства к.т.н. Мисковець С.В.</i>		

7. Дата видачі завдання «02» 09 2024 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів кваліфікаційної роботи	Примітка
1.	<i>Вступ. Літературний огляд.</i>	<i>15.10.2024</i>	
2.	<i>Планування та виконання експерименту.</i>	<i>05.11.2024</i>	
3.	<i>Опис та аналіз результатів експерименту, розробка рекомендацій та висновків</i>	<i>26.11.2024</i>	

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи \_\_\_\_\_  
( підпис ) (прізвище та ініціали)

## АНОТАЦІЯ

Александрук Н.В. Оптимізація структури чавуну ВЧ 50 під гаряче штампування (на матеріалах звіту з переддипломної практики та даних завдання до кваліфікаційної роботи). Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра освітньої програми "Матеріалознавство" спеціальності 132 "Матеріалознавство". Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2024.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. У розділах роботи висвітлено: характеристику чавунів як конструкційних матеріалів, особливості та відомі способи пластичної деформації високоміцних чавунів, методика досліджень, структуру та властивості виливків з високоміцного чавуну марки ВЧ 50, вплив відпалу на структуру та властивості чавуну, вплив пластичної деформації на структуру та властивості чавуну ВЧ 50. Текстова частина містить 60 сторінку тексту, 30 рисунків, 5 таблиць, 15 літературних джерел та посилань, 1 додаток у вигляді презентації результатів досліджень. Презентація представлена на 10 слайдах.

В кваліфікаційній роботі досліджено вплив пластичної деформації на структуру та властивості високоміцного чавуну марки ВЧ 50, на основі чого оптимізовано технологію обробки чавунного литва для реалізації процесів штампування заготовок.

Ключові слова: чавун, виливок, структура, механічні властивості, графіт, відпалювання, пластичність, деформація.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ			
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Александрук			Оптимізація структури чавуну ВЧ 50 під гаряче штампування / The structure of the cast iron EN-GJS-500-7 for hot die forming of optimization	Літ.	Арк.	Акрушів
Перевір.		Гусачук					3	60
Реценз.						ЛНТУ, каф. матеріалознавства, гр. ПММ-21		
Н. Контр.		Мисковець						
Затверд.		Мельничук						

## ANNOTATION

Aleksandruk N. The structure of the cast iron EN-GJS-500-7 for hot die forming of optimization (based on the materials of the report on bachelor's practice and the data of the assignment for qualifying work). Manuscript.

Qualifying work of a master's degree of the Educational Program "Material Science" in the specialty 132 Material Science. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2024.

The master's qualification work consists of an introduction, five chapters, conclusions, a list of sources used and appendices. The chapters of the work cover: characteristics of cast iron as structural materials, features and known methods of plastic deformation of high-strength cast irons, research methodology, structure and properties of castings from high-strength cast iron of the GJS-500 brand, the effect of annealing on the structure and properties of cast iron, the effect of plastic deformation on the structure and properties of cast iron GJS-500. The text part contains 60 pages of text, 30 figures, 5 tables, 15 literary sources and references, 1 appendix through presentation of research results. The presentation is presented on 10 slides.

The qualification work investigated the influence of plastic deformation on the structure and properties of high-strength cast iron of the GJS-500 brand, on the basis of which the technology for processing cast iron castings was optimized for the implementation of blank stamping processes.

Key words: cast iron, casting, structure, mechanical properties, graphite, annealing, plasticity, deformation.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						4
Вум.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ .....	8
1.1 Загальна характеристика чавунів .....	8
1.2 Отримання високоміцних чавунів.....	11
1.3 Особливості термічної обробки чавунного литва .....	14
1.4 Досвід та особливості застосування технологій пластичного деформування високоміцних чавунів .....	18
1.5 Висновки та постановка мети магістерської роботи .....	21
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ .....	23
2.1 Опис матеріалу та процесу підготовки зразків.....	23
2.2 Методика структурного аналізу.....	24
2.3 Проведення термообробки зразків .....	26
2.4 Методи визначення механічних властивостей .....	29
2.5 Дослідження процесу пластичного деформування .....	31
РОЗДІЛ 3 СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИЛИВКІВ ЧАВУНУ ВЧ 50 .	34
3.1 Структура чавуну ВЧ 50 у литому стані.....	34
3.2 Результати дослідження фазового складу литого чавуну .....	38
3.2 Результати дослідження твердості виливків.....	40
РОЗДІЛ 4 ВПЛИВ ГРАФІТИЗАЦІЇ НА СТРУКТУРУ ВИЛИВКІВ .....	42
4.1 Дослідження процесу нормалізації структури чавуну .....	42
4.2 Вплив графітуючого відпалу на структуру ВЧ 50 .....	44
4.3 Твердість чавуну ВЧ 50 після відпалу .....	47
РОЗДІЛ 5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ЧАВУНУ ВЧ 50.....	49
5.1 Дослідження процесу деформування виливків .....	49
5.2 Вплив нормалізації на пластичність зразків .....	52
5.3 Вплив феритизації на пластичність зразків .....	54
ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ.....	57
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	59
ДОДАТОК	

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

## ВСТУП

Чавун займає одне з провідних місць серед сучасних конструкційних матеріалів, причому спостерігається стійка тенденція збільшення обсягів його використання з переважанням високоякісних марок. Це пояснюється кращими ливарними та технологічними властивостями чавуну в порівнянні зі сталлю, а також деякими унікальними, властивими тільки йому особливостями.

Завдяки хорошим ливарним і технологічним властивостям, високій стійкості проти зносу, здатності до демпферування і гасіння вібрацій та шуму, хорошій прироблюваності, меншій, ніж у сталі, щільності, невисокій вартості чавунне лиття успішно конкурує зі сталевим прокатом при виготовленні низки відповідальних деталей (колінчасті вали, зубчасті колеса). Серед країн, що є найбільшими виробниками виливків із високоміцного чавуну, нині перше місце, безперечно, і з великим відривом займає Китай – до 35% усього світового виробництва, далі йдуть США – 25 %, Японія – 10 %, Німеччина – 7 %, Індія. – 5 %.

Наявність графітних включень забезпечує меншу, ніж у сталі, питому вагу, кращі антифрикційні властивості, здатність швидше гасити вібрації та резонансні коливання, знижений рівень шуму.

Форма графітних включень у різних типів чавунів істотно відрізняється (пластинчаста, пластівчаста, куляста). Ще більша різноманітність видів графітних включень (у формі дисків, еліпсоїдів, веретен, ниток) забезпечує гаряча пластична деформація чавуну. Використовуючи деформацію, з чавуну можливе виготовлення відповідальних машинобудівних деталей, наприклад, автомобільних шестерень. В останні роки багатьох дослідників цікавить вплив морфології графітних включень на рівень шуму під час роботи конкретних деталей машин та механізмів.

Можливим розширенням областей застосування високоміцного чавуну було формування мікроструктури металевої матриці не класичного типу у вигляді ферито-перлітної суміші, а поєднання бейніту та залишкового

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		6

аустеніту, одержуване за рахунок спеціальної термічної обробки. Збільшення феритної фази у структурі виливків дозволяє розширити можливості щодо технологій формування заготовок з використанням пластичної деформації чавуну.

Основними напрямками отримання чавунів із підвищеними властивостями на машинобудівних підприємствах є оптимізація хімічного складу та суворе дотримання технології плавки. Водночас нині певний інтерес викликає і гаряча пластична деформація чавуну, що дозволяє підвищити його властивості та надати виливкам форму, близьку до готового виробу. Удосконалення структури чавуну та технологій пластичної деформації є актуальним питанням у практиці використання високоміцних чавунів.

					<i>MP 0124.00.00.000 ПЗ</i>	<i>Арк.</i>
<i>Вим.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		7

## РОЗДІЛ 1

### ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ЧАВУНІВ У ПРОМИСЛОВОСТІ

#### 1.1 Загальна характеристика чавунів

Високоміцний чавун (ВЧ) є одним з відносно нових інженерних матеріалів. Вперше він з'явився наприкінці 1940-х років. З тих пір є великі результати для повного розвитку його потенціалу, розуміння його характеристик, вирішення проблем його виробничих технологій і безпечного використання в інженерних додатках. Збільшення кількості вузлів феритного ковкого чавуну дещо збільшує модулі пружності, знижує межу міцності та текучості та суттєво зменшує подовження та зменшення площі у відсотках [1]. Ковкий чавун має кращу стійкість до розтріскування, ніж сірий чавун (у 6...10 разів), але зростання тріщин у високоміцних чавунів вище, ніж у сталей [2-4].

Структурний стан чавунів залежить від хімічного його складу (таблиця 1.1), а також від технології литва та термічної обробки. Для високоміцного чавуну з кулястим графітом характерні підвищені значення пластичності і в'язкості, які обумовлені кулястою формою включень графіту, одержуваної в литому стані. Разом з тим високоміцні чавуни з кулястим графітом мають високу міцність, у зв'язку з чим ці чавуни в нашому стандарті отримали назву високоміцних.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад високоміцних чавунів, ДСТУ 3925-99

Марка чавуну	Масова частка елементів, %					
	C	Si	Mn	P	S	Cr
			не більше			
ВЧ 35	2,7...3,8	1,9...2,6	0,2...0,6	0,1	0,02	0,05
ВЧ 40	3,3...3,8	1,9...2,6	0,2...0,6	0,1	0,02	0,05
ВЧ 45	3,4...3,8	1,9...2,6	0,2...0,6	0,1	0,02	0,10
ВЧ 50	3,2...3,4	1,9...2,6	0,2...0,9	0,1	0,02	0,15
ВЧ 60	3,2...3,6	1,9...2,6	0,4...0,7	0,1	0,01	0,15
ВЧ 70	3,2...3,6	1,9...2,6	0,5...0,9	0,1	0,01	0,15
ВЧ 80	3,2...3,6	1,9...2,6	0,5...0,9	0,1	0,01	0,15
ВЧ 100	3,2...3,6	2,3...2,8	0,6...0,9	0,1	0,01	0,15

Підвищення вмісту силіцію у високоміцному чавуні сприяє формуванню вільної від карбідів структури з однофазною термодинамічно-стабільною зміцненою феритною матрицею і зростанню механічних властивостей. За досягнення граничного вмісту силіцію, який залежить від кількості у розплаві шкідливих домішок (фосфор, сірка), способу модифікування, швидкості охолодження та інших факторів, може відбуватися окрихчування твердого розчину. В результаті цього знижуються пластичність та ударна в'язкість високоміцного чавуну. Вважається, що граничний вміст кремнію у чавуні складає 4,2...4,4 %мас. Висока пластичність литого металу досягається за вмісту фосфору в чавуні менше 0,04 %мас. За такого вмісті зменшується його ліквіація без утворення в чавуні крихкої евтектики.

Чавуни з кулястим графітом мають широкий діапазон механічних та експлуатаційних властивостей [4, 5]. Феритні чавуни з кулястим графітом характеризуються найвищою серед чавунів пластичністю і в'язкістю, перлітні чавуни мають високу опірність до статичних і циклічних навантажень, в бейнітних чавунах поєднується максимальна міцність з досить високою пластичністю.

Характерні типи мікроструктури чавунів з кулястим графітом показані малюнку 1.1. У стандартах передбачено вісім марок високоміцних чавунів із кулястим графітом (таблиця 1.1). Марка високоміцного чавуну визначається показниками тимчасового опору розриву при розтягуванні та умовної межі плинності.

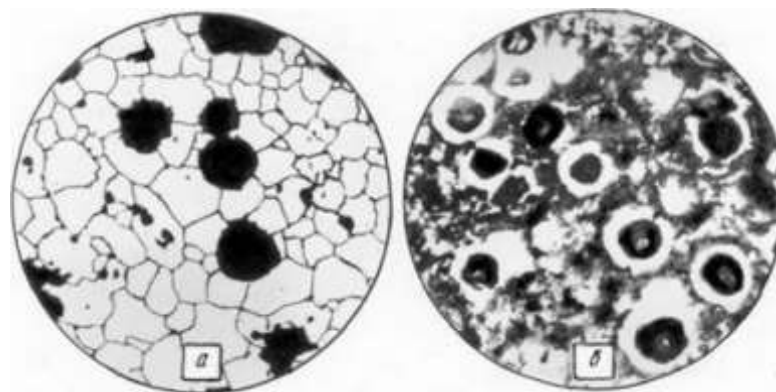


Рисунок 1.1 – Структура високоміцного чавуну:  
а – феритного; б – перлітного

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Таблиця 1.1 – Марки та властивості високоміцних чавунів

Марка чавуну	Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	Межа текучості $\sigma_{0,2}$ , МПа	Відносне видовження $\delta$ , %	Твердість НВ, МПа
ВЧ 35	350	220	22	1400...1700
ВЧ 40	400	250	15	1400...2020
ВЧ 45	450	310	10	1400...2250
ВЧ 50	500	320	7	1530...2450
ВЧ 60	600	370	3	1920...2770
ВЧ 70	700	420	2	2280...3020
ВЧ 80	800	480	2	2480...3510
ВЧ 100	1000	700	2	2700...3600

Механічні властивості чавуну з кулястим графітом повинні бути забезпечені в литому стані або після термічної обробки. Показники відносного подовження, твердості, ударної в'язкості визначають лише за наявності вимог до нормативно-технічної документації, вони повинні відповідати нормам стандартів.

Найбільш високі значення пластичності, відносного видовження та ударної в'язкості мають феритні чавуни марок ВЧ 35, ВЧ 40, ВЧ 50. Перлітні чавуни поступаються за пластичністю та в'язкістю.

Особливо високою ударною в'язкістю в діапазоні температур від +20°C до -80°C характеризуються чавуни з дуплексною феритно-бейнітною структурою металевої матриці [6]. Однак присутність мартенситу в структурі феритно-бейнітних або бейнітних чавунів значно знижує їхню ударну в'язкість та зменшує пластичність.

З метою покращення механічних властивостей високоміцних чавунів застосовуються різноманітні методи та технології термічної обробки [7], зокрема: відпалу, нормалізації, гартування. Часто ці методи доповнюють легуванням чавунів. Хімічний склад зливку відіграє важливу роль у визначенні співвідношення фериту і перліту у матриці ВЧ. Припускається, що високий вміст кремнію «долає» ефекти перлітизації, спричинені марганцем і фосфором. Крім того, варто зауважити, що вплив кремнію на властивості пов'язаний з вмістом марганцю, тому що при малому вмісті останнього

кремній підвищує деякі механічні властивості феритного високоміцного чавуну, такі як межа плинності і міцність на розтяг.

Отримання феритно-перлітних або повністю феритних матриць залежить від вмісту марганцю і фосфору [8]. Ці легуючі елементи сприяють формуванню перліту в матриці. Таким чином, вміст цих елементів повинен бути вищим для досягнення повністю феритної структури металевої матриці, що надає більшої пластичності сплавам.

Механічні властивості чавуну з кулястим графітом відповідно до вимог стандартів [4, 5] контролюють у зразках, виготовлених із окремо відлитих або прилитих до виливків проб. Міцність і твердість чавуну в пробах зазвичай вища, ніж у реальних виливках. Властивості чавуну з кулястим графітом, так само як у сірого та ковкого чавунів, залежать від товщини стінки виливка.

## 1.2. Отримання високоміцних чавунів

Отримання в структурі чавуну кулястої форми графіту засноване на роздільній або спільній обробці рідкого чавуну магнієм, кальцієм та іншими присадками [2, 9], що містять в тій чи іншій кількості зазначені речовини. Найбільш поширеним у світовій практиці способом отримання високоміцного чавуну є магнієвий процес, заснований на введенні в розплав металевого магнію, магнієвих лігатур і комплексних модифікаторів, що містять магній.

Під модифікуванням розуміють термодинамічно нестабільні хімічні, а також енергетичні дії, ефекти від яких в часі після їх реалізації носить екстремальний характер. Модифікування – це процес активного регулювання первинної кристалізації і (чи) зміни дисперсності фаз, що кристалізуються, шляхом введення в розплав малих добавок окремих елементів або їх з'єднань.

Виробництво високоміцного чавуну з кулястою формою графіту виконується різними способами (рисунок 1.2). Часто застосовують сфероїдизуючу обробку розплаву магнієм або магнієвмісними комплексними добавками в герметизованому автоклаві або, безпосередньо, у відкритих

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

ковшах. У деяких випадках застосовують спосіб обробки в потоці розплаву, що заливається в ливарну форму. Існуючі способи модифікування мають свої особливості, переваги й недоліки, а також раціональну область застосування.

На рисунку цифрами позначено: 1 – дзвіночок; 2 – кришка; 3 – корпус автоклаву; 4 – ківш з металом; 5 – мішалка; 6 – порожнина для модифікатору; 7 – кришка ковша; 8 – модифікатор.

Слід зазначити, що на вибір того чи іншого способу введення модифікатора впливають масштаби виробництва та вартість обладнання, яке застосовується у процесі.

Для невеликих об'ємів виробництва доцільно використовувати перший, добре відомий спосіб виробництва високоміцного чавуну, що полягає у зануренні модифікатора у сталевому дзвіночку (рисунок 1.2, а). Дзвіночок опускають в глиб металу. Надмірний тиск металу близько 0,5 МПа виключає бурхливе кипіння магнію і викид металу з посудини.

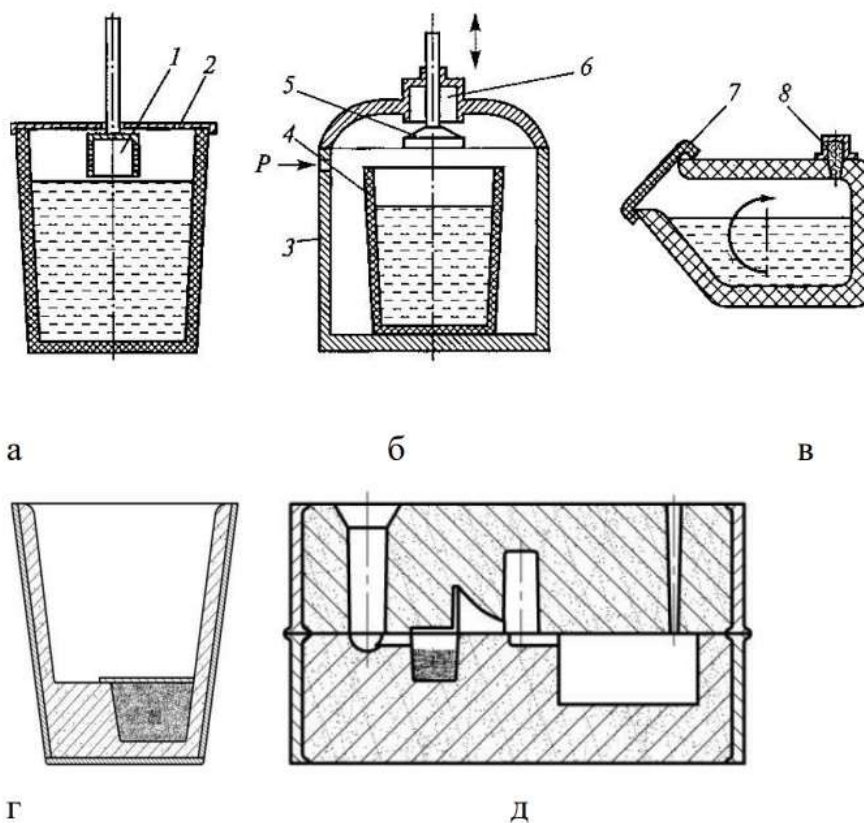


Рисунок 1.2 – Способи модифікування чавуну:

а – дзвіночком; б – в автоклаві; в – в ковші-конвертері; г – у відкритому ковші («Сендвіч-процес»); д – внутрішньоформове

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Другий спосіб, що полягає у обробці рідкого розплаву в автоклаві, застосовують для випадків використання не спеціальних лігатур, а чистого магнію.

Широкого поширення набув також спосіб модифікування у герметичному ковші (рисунок 1.2, в). За цим способом у бокову порожнину ковша закладають порцію модифікатора. Після заливки металу ківш закривають кришкою і повертають у вертикальне положення, щоб розплав повністю омивав модифікатор.

Перспективним є внутрішньоформове модифікування, за якого феросиліцій з кальцієво-магнієвою лігатурою в подрібненому стані поміщують в реакційний канал ливарної форми. Метал, проходячи з стояку в шлаковловлювач і далі в порожнину форми, розчиняє та реагує з модифікатором.

Основною відмінною технологічною особливістю способів є часовий інтервал між введенням модифікатора в розплав чавуну і початком його кристалізації, який визначається технологією модифікування і розливання рідкого чавуну в ливарні форми. Це суттєво впливає на структуру, механічні та експлуатаційні властивості високоміцних чавунів у литому стані.

Вплив швидкості охолодження та товщини стінки виливки пов'язано з тим, що в товстих перерізах підвищується кількість фериту, збільшується небезпека флотації графіту, погіршення його форми та розподілу, посилюється мікроліквація карбідоутворювальних та демодифікуючих елементів. Все це викликає зниження міцності, в'язкості та скорочує працездатність товстостінної деталі в експлуатації.

Усі процеси структурообрання в чавуні є дифузійними, основну роль них грає вуглець, швидкість дифузії якого визначає кінцеву структуру металевої матриці чавуну з кулястим графітом, як і литому стані, і після термообработки. Сфероїдизуюче модифікування визначає ступінь отримання кулястих включень, інокулююче – кількість зародків графітної фази. Від

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

поєднання цих двох процесів модифікування у часі залежить кінцева структура графіту в чавуні.

### 1.3. Особливості термічної обробки чавунного литва

Високоміцні чавуни мають високі ливарні властивості: рідкотекучість практично всіх марок високоміцних чавунів до 600 мм, усадка у виливках до 1 мм. Ліквация у цих чавунів практично відсутня. Крім того, виливки з високоміцних чавунів мають високу оброблюваність різанням (струганням, фрезеруванням, шліфуванням тощо), високі зміцнюваність і прогартовуваність. З метою зміни (виправлення) структури виливки з міцних чавунів піддаються різним видам термічної обробки.

Важливим фактором, що ефективно підвищує фізико-механічні властивості чавунів, є термічна обробка [9]. Найчастіше необхідні властивості чавунів досягаються в литому стані, проте, крім підвищення механічних властивостей чавуну, термообробку проводять з метою покращити оброблюваність, зняти внутрішні напруження, змінити структуру та інше.

Основні види термічної обробки, що застосовуються для чавунів з кулястим графітом: високотемпературний графітизуючий відпал, нормалізація, низькотемпературний феритизуючий відпал, загартування, відпустка, ізотермічна загартування, поверхневе загартування. Існують спеціальні методи термообробки, наприклад термоциклічна обробка [9].

Головний чинник на процеси структуроутворення при термообробці – регульована швидкість охолодження. Принцип термообробки, що застосовується для зміни структури виливків з чавуну з кулястим графітом, полягає в їх нагріванні вище за критичні температури з метою отримання однорідної аустенітної структури і подальшому керованому охолодженні. Аустенітизація може проводитися повільним нагріванням у термічних печах або швидким індукційним нагріванням у загартованому контурі [4, 9]. До

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

цього часу немає абсолютної ясності щодо призначення температур на аустенітизацію для чавунів, на відміну від сталей.

Повну картину процесів формування литої структури чавунів може дати сукупність термокінетичних діаграм, що відображають явища, що відбуваються як при кристалізації, так і при охолодженні виливки в твердому стані. Під час кристалізації високоміцного чавуну виникає хімічна неоднорідність сплаву як у межах всієї виливки (зональна), так і в межах дендриту (дендритна ліквация).

Висока швидкість охолодження розплаву перешкоджає дифузії вуглецю і тим більше дифузії атомів легуючих елементів. Практика показує, що чим вища концентрація елемента і чим більша різниця його розчинності в рідкій та твердій фазах, тим більшою мірою розвивається його ліквация. Активні технологічні впливи на розплав шляхом модифікування, легування, фізичних методів обробки на розплав, що кристалізується, дозволяють впливати на величину зерна, подрібнення гілок і самих дендритів, фазовий склад сплаву і відповідно фізико-механічні та експлуатаційні властивості чавуну.

Рівень механічних властивостей чавуну з кулястою формою графіту, підданого ізотермічному відпалюванню чи гартуванню, залежить від температури аустенізації, швидкості охолодження, ізотермічної температури фазового перетворення, часу витримки при цій температурі.

Першим етапом термічної обробки є нагрівання виливків до критичних температур аустенітного перетворення (рисунок 1.3), до певної температури в надкритичній ділянці, витримка для гомогенізації вуглецю з метою отримання однорідного аустеніту. Температури аустенізації, час витримки при ній вибирають залежно від хімічного складу та вихідної структури матриці чавуну.

Як правило, для високоміцних чавунів, температура аустенізації знаходиться в межах температурного інтервалу 950...1050 °С, а час витримки складає 1...2 години для початкової перлітної структури. Далі слідує стадія

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



збільшення часового інтервалу витримки виливків за температур евтектоїдного інтервалу. Тому, у практиці термообробки високоміцних чавунів на феритну структуру металевої основи, рекомендується виконання першої стадії графітизації, з незначною витримкою за температур аустенізації.

На властивості високоміцного чавуну після феритизації впливають ступінь сфероїдизації та кількість включень кулястого графіту, збільшення числа включень забезпечує рівномірну дрібнозернисту структуру вихідного чавуну після термічного відпалювання (рисунок 1.4), і відповідно, більшу ймовірність отримання підвищеної пластичності металевої матриці чавуну.

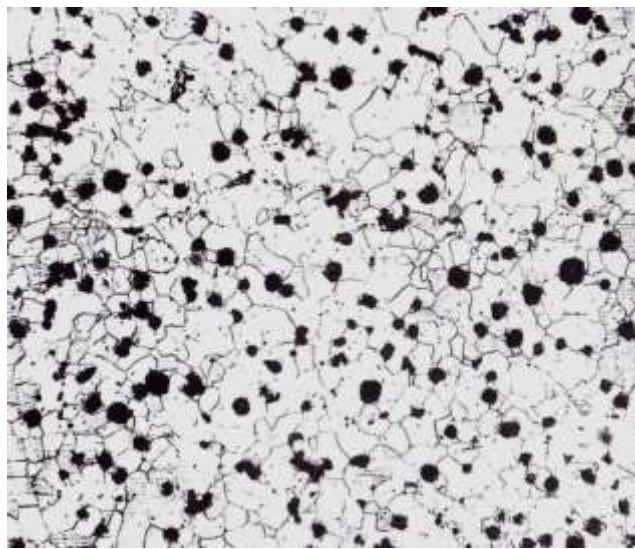


Рисунок 1.4 – Типова структура феритного високоміцного чавуну [10]

Найбільш вигідним для потреб штампування дрібних та середніх фасонних заготовок машинобудування, є отримання чисто феритної структури чавуну. Проте, досягнути цього, у практиці використання чавунного литва, є досить складним завданням, особливо для легованих чавунів. Тому феритизуючий відпал є основним способом підвищення пластичності високоміцних чавунів.

Отже, з метою покращити оброблюваність, зняти внутрішні напруження, змінити структуру, підвищення пластичності для високоміцного чавуну доцільне проведення двостадійного графітизуючого відпалу.

#### 1.4. Досвід та особливості застосування технологій пластичного деформування високоміцних чавунів

Важливою експлуатаційною властивістю деталей, виготовлених з високоміцних чавунів, є їхня продуктивність у вузлах тертя та вконструкціях з високими питомими навантаженнями (траверса преса, шобот кувального молота тощо). У турбобудуванні з високоміцного чавуну виготовляють корпуси парових турбін, лопатки направляючих апаратів, в тракторо- і дизелебудуванні – колінчасті вали, поршні та інше. Високоміцні чавуни знаходять широке застосування в автотранспортному машинобудуванні, у виробництві прокатного, ковальсько-пресового, підйомно-транспортного та каменеподрібноючого обладнання замість великогабаритного сталевого лиття, поковок та штампувань вагою до 48 тон тощо.

У практиці використання чавунів існує думка, що включення графіту є «надрізами», які знижують його міцність та пластичність. Це відбувається, по-перше, внаслідок деякого зменшення «живого» перерізу металу через порожнини, зайняті графітом, що мають невелику міцність на розрив, і, по-друге, що найбільш важливо, через високу концентрацію напружень, що виникає в зонах включень, особливо при пластинчастій формі. Дані аспекти призводять до різкої локалізації пластичних деформацій в металевій основі і в результаті – до квазікрихкого руйнування матеріалу при середніх напругах і нижчих показниках пластичності в порівнянні зі значеннями міцності та пластичності металевої основи чавуну [11]. На практиці необхідно звести до мінімуму шкідливий вплив включень графіту, підвищуючи характеристики міцності основи: 1) застосування різних способів лиття (модифікування, графітизація), 2) термообробка, 3) обробка металів тиском (ковка, штампування, пресування тощо). Один із найперспективніших способів – використання методу деформування за схемою всебічного нерівномірного стиску, що реалізується у технологічних процесах видавлювання та пресування. Використання даного методу забезпечує деформування чавуну з

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

високими ступенями деформації, які значно змінюють міцність і твердість, опір корозії та зносу чавунних виробів.

Вибір раціональних режимів термічної обробки у поєднанні з пластичною деформацією надає чавуну властивості конструкційного або інструментального матеріалу, а також одержанню особливого комплексу фізико-хімічних властивостей. Деформований високоміцний чавун може застосовуватись для виготовлення відповідальних виробів, що використовуються при підвищених навантаженнях. Куляста форма графіту в чавунних заготовках допускає застосування великих пластичних деформацій (близько 80 %). Після деформації можливі різні режими термічної обробки, які різною мірою змінюють механічні властивості. Деформований чавун характеризується анізотропними властивостями, що слід враховувати під час виборів режиму термічної обробки.

За останні роки були випробувані різні методи кування для деформації феритного та перлітного високоміцного чавуну [12, 13]. Витяжку на плоских бойках молота проводили після ступінчастого нагріву до 950 °С. За один нагрівання та три підігріву заготовку з перлітного чавуну діаметром 120 мм прокували на прямокутний переріз 48x57 мм. Заготовки з феритного чавуну діаметром 119 мм кували з кола на квадрат, а потім з ребер квадрата до наступного квадрата. При перерізі 60 мм у поковках з'являлися тріщини, а при перерізі 50 мм наставала повна руйнація металу. Таким чином, гранична уковка за кування на плоских бійниках становив 4,5. Куванням у підкатних рівчаках різних діаметрів на молоті отримували ступінчасті вали діаметрами від 120 до 10 мм, шестерні та зубчасті колеса, зубчасті пари диференціалів вантажних автомобілів (рисунок 1.5).

У роботі [14] при температурі 1060...850 °С кували високоміцний чавун на пневматичному молоті. Кування починали слабкими ударами, після досягнення ступеня деформації 10...15 % енергію удару збільшували до максимальної. Отримано ступінь деформації 50 % при високій якості поковок. Аналогічні результати отримані японськими дослідниками [6], які успішно

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

кували високоміцний чавун при температурі 950 °С зі ступенем деформації до 50 %. Тріщин та дефектів не виявлено.



Рисунок 1.5 – Приклади кованих та штампованих виробів з високоміцного чавуну

Крім вітчизняних науковців дослідженням процесів пластичного деформування займались також багато американських, французьких та японських вчених та інженерів. Більшість з них виконували кування та штампування як ковкого так і високоміцного чавуну.

Після порівняльних досліджень динамічного осадження сірого перлітно-феритного та ковкого феритного чавунів звичайного хімічного складу в інтервалі температур 20...1100С встановили, що для цих матеріалів не рекомендується використовувати відкрите осаджування та прокатування, які супроводжувались утворенням тріщин.

Завершуючи розгляд дослідів з кування чавунів та інших високовуглецевих сплавів заліза, можна відзначити наступне. Всі види чавунного литва, крім сплавів із пластинчастими включеннями графіту, тобто сірих чавунів, піддаються ковці або штампуванню. Однак слід зазначити, що при куванні необхідно зберігати вузький інтервал деформації, застосовувати багаторазові проміжні підігриви, легкі удари, обмежений ступінь деформації за один прохід. Покращити здатність високоміцного чавуну до пластичного деформування можна застосуванням термічної обробки.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

## 1.5. Висновки та постановка мети магістерської роботи

Високоміцний чавун з кулястим графітом є однією з найбільш широко використовуваних груп матеріалів, причому як альтернатива традиційним матеріалам для певних видів деталей (наприклад, застосування високоміцного чавуну замість деяких кольорових сплавів і сталей).

Структура та властивості високоміцного чавуну з кулястим графітом визначаються хімічним складом (насамперед вмістом кремнію), способом плавки та модифікування, видом та режимом термічної обробки.

Феритний чавун з кулястим графітом має максимальну міцність і досить високу пластичність, а також має такі спеціальні властивості як зносостійкість, достатня втомна і контактна витривалість. Структура металевої основи феритного чавуну з кулястим графітом – ферит та залишковий перліт (до 10 % за об'ємом). Одержання такої структури досягається повільним охолодженням масивних виливків з подальшим термічним обробленням у вигляді відпалу графітизації.

Для деформування високоміцного чавуну придатна більшість схем деформації. Найкращі з них ті, в яких використовується нерівномірне тривісне стиснення (видавлювання, пресування, закрите штампування) при зниженій швидкості деформації в штампувальному інструменті, що підігрівається. Загальні особливості деформації чавуну: малий ступінь деформації за прохід, вузький температурний інтервал, підвищені зусилля. Ресурс пластичності чавуну перед пластичною деформацією може бути підвищений у 2 рази спеціальною термічною обробкою. Крім надання деталі точної форми, пластична деформація суттєво підвищує механічні властивості чавуну, до 2...3 разів, що актуально для ресурсозбереження.

Отже, метою магістерської роботи є отримання оптимального структурного стану заготовок з високоміцного чавуну марки ВЧ 50 для виготовлення фасонних виробів машинобудування з використанням процесів гарячого штампування.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Для досягнення поставленої мети слід виконати такі завдання:

- дослідити структуру виливків з високоміцного чавуну марки ВЧ 50 загального використання, що отримані звичайними технологічними методами литва;
- дослідити вплив режимів відпалу на структуру та твердість виливків з чавуну ВЧ 50;
- розробити оптимальний режим відпалювання для отримання феритної структури високоміцного чавуну марки ВЧ 50;
- розробити рекомендації щодо оптимізації термічної обробки високоміцного чавуну ВЧ 50 для процесів пластичного деформування.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 2.1. Опис матеріалу та процесу підготовки зразків

Для дослідження структури та механічних властивостей були проведені індукційні електроплавки графітизованих чавунів, хімічні склади яких вибиралися на основі аналізу літературних даних та результатів теоретичних досліджень та розрахунків. Враховуючи рекомендації щодо отримання високоміцного чавуну, у роботі застосовували широко поширений спосіб модифікуючої обробки, відомий як "сандвіч-процес".

На відлитих зразках, що являли собою циліндри, діаметрами від 20 до 30 мм, проводилися випробування з визначення твердості. Термічна обробка проводилася на зразках у вигляді пластин перерізом 20x20 мм та на циліндрах діаметром 20 мм.

Виплавку чавуну проводили в індукційній тигельній печі, живленням від високочастотного генератора ГВ-15. Використовувалися кисле кварцове футерування тигля. Шихта складалася з відходів вуглецевої сталі, передільного чавуну, феросплавів (феросиліцію, феромарганцю та феромолібдену), електродного бою та електротехнічної міді. Під час виплавки чавуну особливу увагу приділяли температурному режиму. При випуску чавуну температуру металу на жолобі плавильного агрегату тримали у межах 1400...1450 °С.

Як модифікатор використовували відомі комплексні лігатури типу ЖКМК, що містять: 7...10% Mg; 3...6% Ca; 1,5...3% PЗМ; 45...55% Si; решта - залізо та домішки. Модифікування проводили методом "сандвіч-процесу" (рисунок 2.1). На дно розігрітого ковша завантажували лігатуру, дроблену до фракцій 3...15 мм (залежно від ємності ковша) у кількості 2...2,5 % від маси рідкого чавуну, потім вводили подрібнений плавиковий шпат у кількості 0,6...1,0% від маси чавуну. У деяких випадках лігатуру перемішували з плавиковим шпатом і завантажували в ківш у вигляді суміші.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

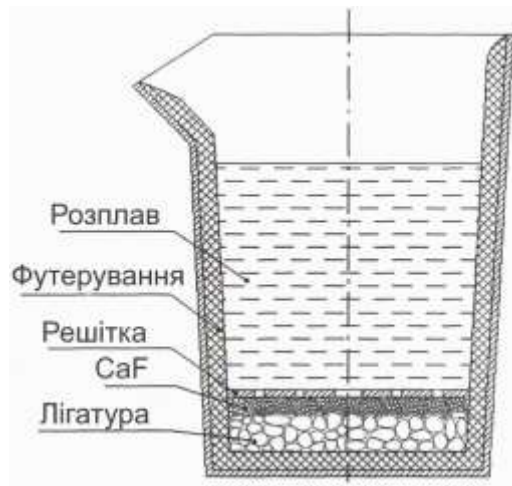


Рисунок 2.1 – Модифікування за "сандвіч-процесом"

За даними хімічного аналізу було отримано зразки чавуну, усереднений хімічний склад яких наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад зразків чавуну

Масова частка елементів, %								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Mg
3,2...3,5	2,7...3,2	0,2...0,5	≤ 0,1	≤ 0,02	≤ 0,1	0,5...0,7	≤ 0,5	0,05

Отримані зразки чавуну за хімічним складом відповідають відомій марці високоміцного чавуну ВЧ 50, у відповідності до ДСТУ 3925-99 "Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки".

## 2.2. Методика структурного аналізу

Основним методом структурного аналізу був металографічний аналіз з використанням оптичних металографічних мікроскопів.

Металографічний аналіз проводився з метою вивчення структури чавунів: досліджувалося наявність та кількість окремих фаз та структурних складових залежно від хімічного складу та термічної обробки сплаву, їх морфологічні особливості, взаємне розташування. Для аналізу використовували оптичні мікроскопи МІМ-10М та цифровий

металографічний мікроскоп ММП-14Ц фірми "Мікротех" (рисунок 2.2), з використанням програмного забезпечення для фіксації та аналізу зображень Image Scope Color за різних збільшеннях (від 100 до 1500 разів).



Рисунок 2.2 – Мікроскоп ММП-14Ц

Мікрошліфи готувалися за типовою методикою на зразках, що пройшли випробування на розтягування або зношування в литому або термообробленому стані. Приготування шліфів для металографічного аналізу чавуну полягало в обробці на абразивному камені, грубому шліфуванні, тонкому шліфуванні та поліруванню. Обробка на абразивному камені зернистістю 45...60 мкм проводилася для вирівнювання поверхні зразків. Грубе шліфування проводилося послідовно на трьох шліфувальних шкурках: № 100...150, № 150...200 и № 280...320. Після цього проводилося тонке шліфування послідовно на дрібнозернистих шкурках: № 40, № 28 и № 20 або на алмазних пастах: АС 28/20, АС 20/14 и АС 10/7.

Для шліфування зразків застосовували водотривкі шкурки різної зернистості, прикріплені диску, що обертається з частотою 700...800 об/хв. Шліфування проводилося тільки в одному напрямку.

Полірування проводили на спеціальному полірувальному верстаті, диск якого обтягнутий електропромисловим повстю (фетром), при частоті обертання 400...600 об/хв. Полірували на водній суспензії оксидів Al, Fe або Cr до повного зникнення рисок. Щоб уникнути утворення "хвостів" на графіті, шліф в останні хвилини полірування обертали навколо осі.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

Хімічне травлення, використовуване виявлення загальної структури чавуну, виробляли 4...5 % етиловим спиртовим, розчином азотної кислоти (ніталем) і 4...5 % спиртовим розчином пікринової кислоти. Розчин пікринової кислоти можна рекомендувати як менш агресивний реактив, при якому поверхня шліфу окислюється менше, а деякі фази (мартенсит, троостит, бейніт) забарвлюються в різні кольори. Реактив забезпечує тонкий малюнок структури, а також виявляє ліквіційну неоднорідність деяких елементів (наприклад фосфору). Час травлення від 5 до 20 секунд.

### 2.3. Проведення термообробки зразків

Відомо, що для високоміцних чавунів найбільш широко розповсюдженні такі види термічної обробки, як відпал, нормалізація, загартування, відпуск. Технологія таких видів обробки добре відома. В даній роботі досліджувалась зміна структури високоміцного чавуну марки ВЧ 50 в перлітних, феритних чавунах та їх характер пластичної деформації в умовах наближених до технологічних процесів закритого штампування.

У практиці графітизуючого відпалу чавунів, в залежності від поставленої задачі, застосовують дві стадії термічної обробки литва.

Перша стадія передбачає нагрівання до температури 950...1050°C зі швидкістю 200...300 °C/год; витримку протягом 10 годин. На цій стадії відбувається розкладання первинного та ледебуритного цементиту, за його наявності у структурі, з утворенням аустеніту з включеннями компактного графіту. Потім слідує зниження температури до 760 °C (зі швидкістю 50...65 °C/год), тобто до температури трохи вище за початок евтектоїдного перетворення. Важливим є забезпечення таких умов дифузійних процесі, щоб переважна більшість вуглецю цементиту, що зазнає перетворення, нашаровувалась на вже існуючі глобулі первинного графіту.

Друга стадія відпалу передбачає повільне охолодження зі швидкістю не вище 5 °C/год у всьому інтервалі евтектоїдного перетворення, аж до 700 °C.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

На цій стадії відбувається розпад цементиту, що входить до перліту. Остаточна мікроструктура чавуну залежить від параметрів другої стадії: короткочасна витримка (близько 5 годин) спричиняє утворення перлітної структури металевої матриці з включеннями компактного графіту, навколо яких розташовується облямівка фериту; тривала витримка протягом 10...15 годин веде до утворення феритної металевої матриці з включеннями компактного графіту, з невеликою часткою перлітних ділянок, до 10 об.%.  
 Для отримання перлітної структури металевої матриці підбирали температурно-часові параметри термообробки, які відповідають режиму нормалізації (рисунок 2.3). Зразки завантажувались в піч електричного опору типу СНОЛ-2,5.4.1,4/11-П1, яку попередньо нагріли до температури 860...880 °С, збільшуючи до 1000 °С. При досягненні стабілізації температури зразки витримували в печі 4 години. Після витримки піч вимикали з мережі струму і знижували температуру до 700...750 °С, яка відповідає температурі початку критичного інтервалу. Після чого, зразки виймали з печі на азбестову підкладку і охолоджували до кімнатної температури.

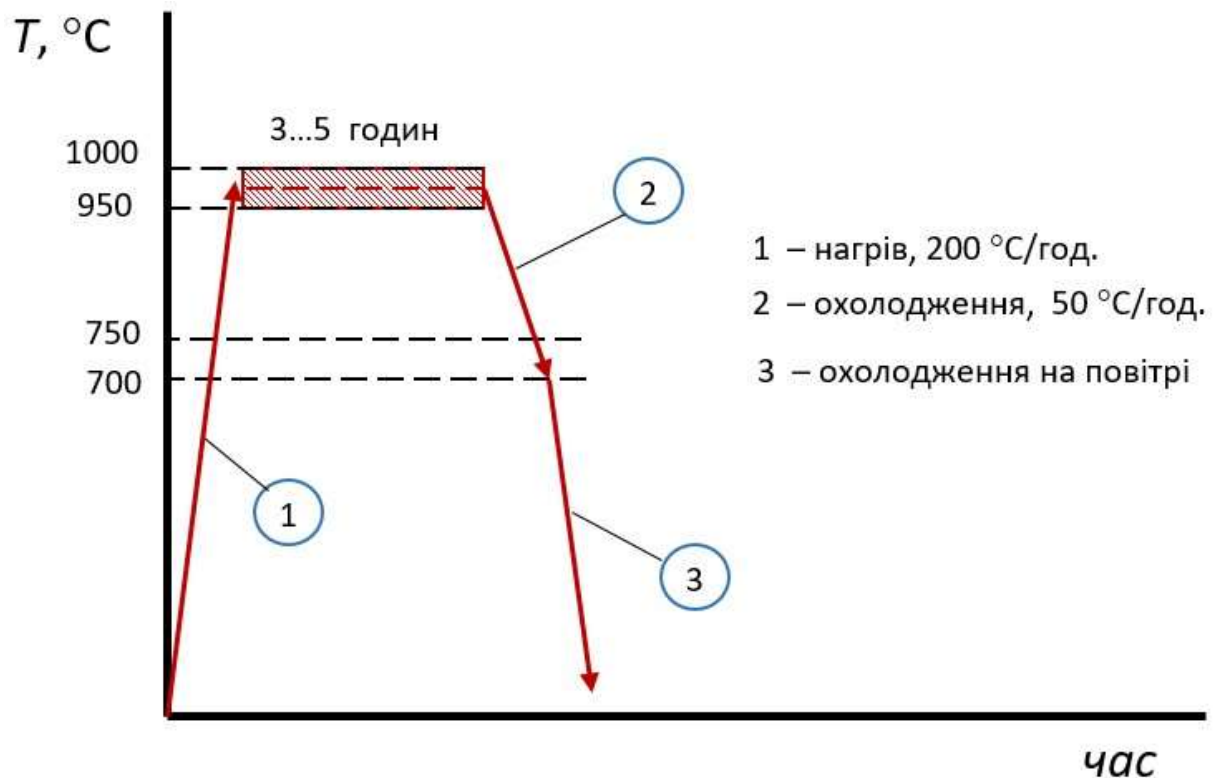


Рисунок 2.3 – Режим нормалізації чавуну

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

При виборі температурно-часових параметрів враховували те, що незначна присутність марганцю та міді у високоміцних чавунах сприяє проходженню першої стадії графітизації та гальмує другу. Ці елементи сприяють стабілізації перліту, а також понижують температурний інтервал евтектоїдного перетворення та зміщують точку евтектоїда до більш високих концентрацій вуглецю.

Температуру контролювали за допомогою термопари типу ТХА, електрорушійну силу якої вимірювали потенціометром постійного струму типу ПП-63 (клас точності 1,05) з поправкою на холодні кінці термопари. Для вимірювання також використовували універсальний цифровий мультиметр моделі М890G, з можливістю прямого вимірювання температури за допомогою термопари К-типу за міжнародною класифікацією. Точність вимірювання становила 1,0 °С.

Так як відомо, що такі елементи як марганець, хром, молібден та частково мідь, підвищують дисперсність продуктів евтектоїдного розпаду, то для отримання перлітних продуктів незначного ступеня дисперсності (перліт чи перліто-сорбітна суміш) застосовували досить повільне охолодження зразків до температури початку критичного інтервалу. Реалізували зменшення швидкості охолодження за допомогою охолодження зразків чавуну разом з піччю. При цьому спад температури в камері печі не перевищував 5,0 °С за хвилину.

Щоб отримати феритну структуру дослідних сплавів проводили двох стадійний графітизуючий відпал, або так званий повний графітизуючий відпал (рисунок 2.4). При цьому, для реалізації даного виду термообробки, зразки завантажувались в піч і нагрівались разом з ними до температури 860...880 °С. Відомо, що ця температура відповідає першій стадії графітизації. Зразки витримували при цій температурі 3 години. Завдяки цьому досягали повного розпаду евтектичного та вторинного цементиту та отримували аустеніто-графітну структуру. За повільного охолодження до інтервалу евтектоїдного

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

перетворення досягнуто гомогенізації металевої основи чавуну та рівномірності розподілу вторинного графіту.

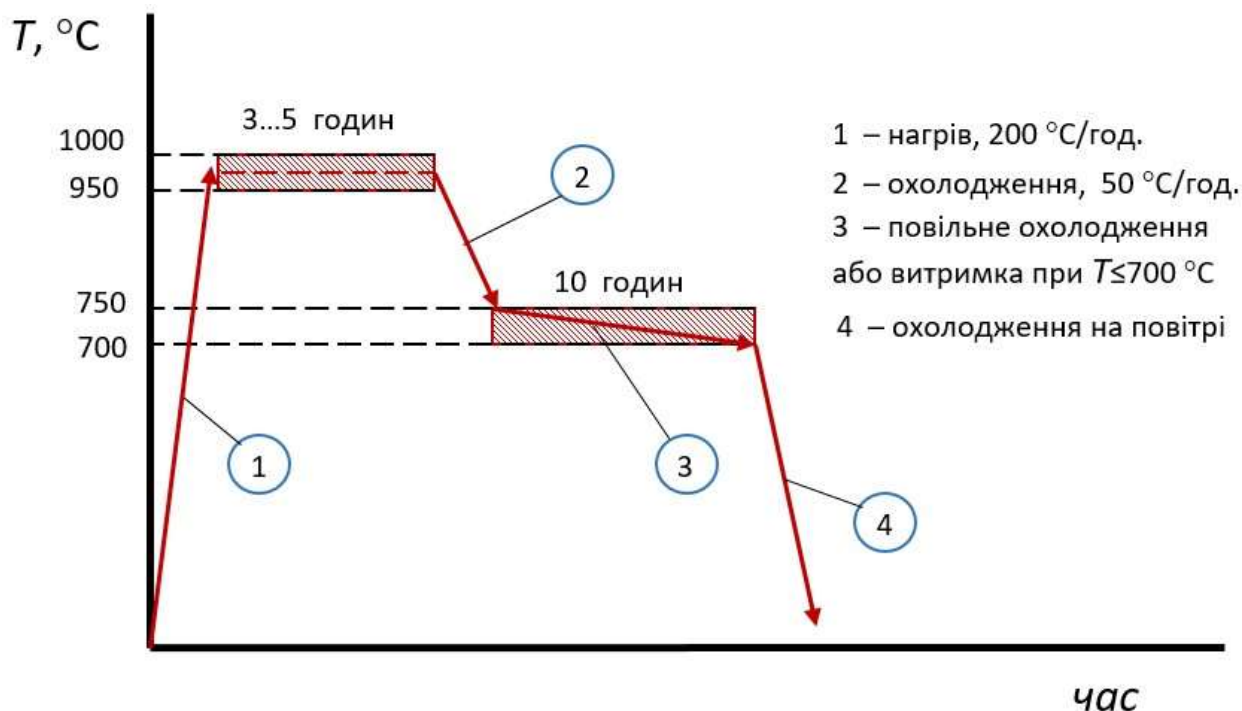


Рисунок 2.4 – Режим феритизації чавуну

Феритної структури металевої матриці досягали під час виконання другої стадії графітизації зразків чавуну. Для цього зразки охолоджували разом з піччю до температури субкритичного інтервалу 700...680 °С. Швидкість охолодження при цьому сповільнювалась і становила не більше 2,0 °С за хвилину. Після досягнення температури субкритичного інтервалу зразки витримували в печі протягом 4 годин. Це проводилось з метою реалізації другої стадії графітизуючого відпалу, тобто феритизації структури металевої основи.

#### 2.4. Методи визначення механічних властивостей

Механічні випробування проводилися з метою визначення межі міцності при розтягуванні та твердості матеріалу. Механічні властивості визначалися на литих та термічно оброблених зразках.

Випробування на розрив проводили машиною УММ-20. Випробовувалися зразки діаметром 10 мм відповідно до стандарту. Твердість

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

визначалася на приладі ТК-2 за методом Роквелла та на пресі Брінелля ТШ-2 при навантаженні 30 кН та діаметрі кульки 10 мм. Твердість визначалася на темплетях (рисунок 2.5), вирізаних із заготовок на дослідження мікроструктури й у механічних випробувань.



Рисунок 2.5 – Зразки (темплети) для вимірювання твердості

Для визначення ударної в'язкості КС виготовлялися по чотири стандартні зразки без надрізу, розміром 10x10x55, які вирізалися з клиноподібних проб чавуну, відлитих з кожного виду чавуну, а також пластин, на яких проводилася термічна обробка. Випробування на ударну в'язкість проводили на копії маятниковому моделі ТМК-300А, який призначений для випробування зразків на двохопорний згин (метод Шарпі) з максимальним зусиллям 30 кгс/см<sup>2</sup>.



Рисунок 2.6 – Зразки (темплети) для вимірювання твердості

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

Підйом маятника у верхнє положення (фіксація заданого кута зарядки маятника) здійснювалася автоматично за допомогою пневматичного пристрою, швидкість руху маятника в момент удару становила 5м/с. Ударна в'язкість розраховувалася автоматично на електронному блоці ПО-3Т. Значення ударної в'язкості кожного виду зразків, визначалося як середнє арифметичне.

## 2.5. Дослідження процесу пластичного деформування

Для деформування чавуну придатна більшість схем деформації. Найкращі з них ті, в яких використовується нерівномірне тривісне стиснення (закрите штампування, видавлювання, пресування). Також деформування доцільно здійснювати при зниженій швидкості деформації в інструменті, що підігрівається. Загалом, характерними особливостями пластичної деформації чавуну є: мала ступінь деформації за один прохід, вузький температурний інтервал, підвищені зусилля деформування, кращі умови контакту заготовки з інструментом завдяки наявності графіту в структурі металу.

У роботі використовували метод, що полягає в осаджуванні нагрітого циліндричного зразка чавуну між двома сталевими плитами. Нагрів чавунного зразка здійснювали до температур гарячої пластичної деформації 950...1050 °С. Під дією торцевого тертя забезпечувався відповідний рівень гідростатичного тиску на зразок чавуну, чим досягалось пом'якшення схеми деформування чавуну.

Для такого виду випробувань використовувався спеціально виготовлений дослідний штамп (рисунок 2.7). Осаджування проводилось між двома жароміцними плитами: верхньою та нижньою. Розмір чавунних зразків для випробувань становив:  $\varnothing 10 \times 20$  мм.

Верхня жароміцна плита 4 прикріплена до пуансона 1, який має можливість рухатись по посадці ковзання у втулці 3, що впресована у верхню

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31



В наслідок значної власної деформації конструкції штамп, ступінь деформації зразка визначали за допомогою спеціального механічного пристосування. Необхідною умовою було фіксування лінійного переміщення безпосередньо жароміцних плит штамп. Механізм дозволяв перетворювати вертикальний рух цих плит у горизонтальний рух штоку, який безпосередньо збуджував стрілочний механічний мікроіндикатор. Шляхом додаткової серії випробувань такого механізму досягнули чіткої індикації ступеня відносної деформації зразка. Можливість використання такого спецпристрою обумовлена незмінністю температури при черговому осаджуванні зразка.

Максимальний рівень деформації зразка кожної партії визначався експериментально. Для досліджень за середніх температур цей спосіб визначення максимального ступеня деформації реалізується досить просто і полягає у спостереженні за зміною зусилля преса під час осаджування. В досліді було помічено, що моменту руйнування при таких температурах відповідає стрибкоподібне падіння зусилля преса. Для чавуну таке явище, крім того, супроводжується звуковим ефектом.

Для дослідження при більш високих температурах ( $\geq 900$  °C) встановлення максимального ступеня деформації вимагало проведення додаткової серії дослідів. Руйнування зразка тут оцінювали по появі тріщин на його бічній поверхні. Після осаджування декількох зразків з різним ступенем деформації, що приблизно відповідав інтервалу руйнування зразка, останні вилучалися з печі для огляду їх бічної поверхні. З серії таких дослідів було визначено початок інтервалу ймовірності руйнування зразка для вибраних умов досліді.

В подальшому навантаження зразків проводилось до ступеня, що відповідав початку інтервалу ймовірності їх руйнування.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

## РОЗДІЛ 3

### СТРУКТУРА ТА ВЛАСТИВОСТІ ВИЛИВКІВ ЧАВУНУ ВЧ 50

#### 3.1. Структура чавуну ВЧ 50 у литому стані

Міцність виливок високоміцного чавуну визначаються структурою металевої основи, а також формою та розмірами графіту. Вплив структурних та фазових складових матриці на механічні властивості чавуну аналогічно стали. Вплив графіту найбільшою мірою визначається його формою.

Куляста форма включень графіту є найбільш компактною, вона має найменше відношення поверхні включень до їх обсягу, внаслідок чого робочий переріз виливки послаблюється меншою мірою, а концентрація напруги на включеннях графіту практично відсутня. За такої форми включень графіту різко зростають як показники міцності, так й пластичні властивості чавуну. Тому чавун з кулястим графітом, як конструкційний матеріал цінний не так міцністю, як пластичністю і в'язкістю.

Поліпшення механічних властивостей, тобто зниження твердості та поліпшення оброблюваності виливків, зняття внутрішніх (залишкових) напружень, виправлення незадовільної первинної литої структури, зокрема відбілювання, а також формування заданої мікроструктури чавуну, не властиве литому стану. У практиці чавунного литва складно досягнути заданої структури високоміцного чавуну, характер якої досить чутливий до умов охолодження, які залежать від конструкції ливарної форми. Тому результати експериментального литва можуть відрізнитись від практичного застосування.

Згідно результатів макроскопічного аналізу підготовлених темплетів (рисунок 3.1) з експериментальних плавок високоміцного чавуну встановлена відносна однорідність макроструктури виливків. Як видно у поперековому перерізі литих прутків структура є рівномірною, без центральної пористості та макродефектів литого металу.

Макроструктуру виливків вивчали на поперечному та повздовжньому зрізах, після шліфування поверхонь.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						34
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 3.1 – Зразки чавуну (темплети), попереківий переріз

У практиці литва чавуну вплив швидкості охолодження на його мікроструктуру та механічні властивості визначається зміною елементів конструкції ливарної форми, і зокрема, локальною товщиною стінки виливка. Дослідження тонкостінних чавунних виливків з товщиною стінки 2...5 мм і для еталонної виливки з товщиною стінки 15 мм, використовуючи різні формувальні матеріали (кремнеземний пісок та ізоляційний пісок) показали різницю литої структури високоміцного чавуну. Це стосується як структури металевої матриці так і морфології графіту (рисунок 3.2).

Для визначення реальної швидкості охолодження на початку затвердіння чавуну було проведено термічний аналіз. Загалом було виявлено, що прогнози, засновані на теоретичному аналізі процесу затвердіння високоміцного чавуну, добре узгоджуються з експериментальними результатами. Дослідження дає зрозуміти вплив швидкості охолодження на кількість графітових колоній, фракцію фериту і перліту, та механічні властивості тонкостінних виливків із високоміцного чавуну.

Дослідження показують, що швидкість охолодження тонкостінних виливків коливається в широкому діапазоні (80...15 °C/c) при зміні товщини стінки від 5 до 15 мм, що супроводжується суттєвою зміною механічних властивостей високоміцного чавуну. Швидкість охолодження може бути ефективно зменшена шляхом застосування ізоляційного піску для отримання

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

бажаних властивостей тонкостінних виливків практично у всьому діапазоні марок високоміцного чавуну відповідно до стандарту.

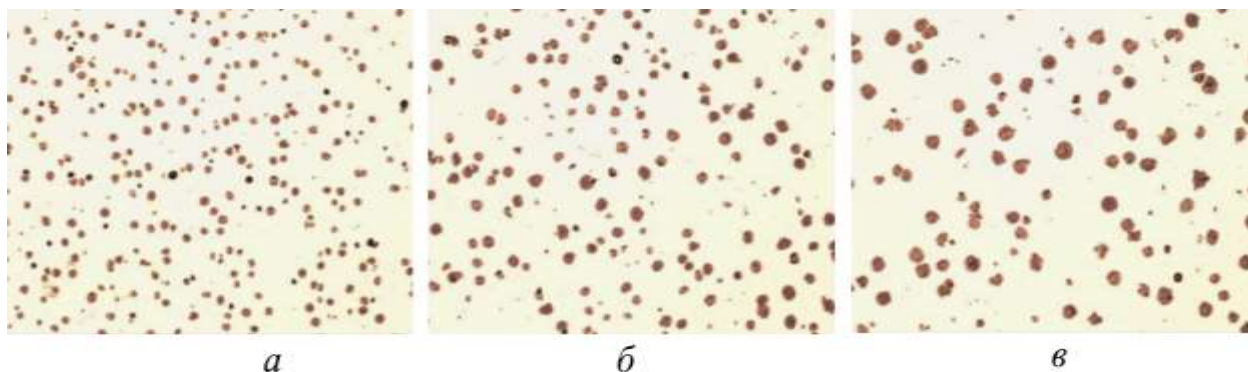


Рисунок 3.2 – Морфологія графіту у виливках ВЧ 50 (x100): а – товщина стінки  $\leq 5$  мм; б – товщина стінки 10 мм; в – товщина стінки  $\geq 15$  мм. Без травлення.

Утворення графітного включення сприяє значному збіднінню Fe-C рідини на атоми вуглецю навколо зростаючого кристаліта. Такий градієнт концентрацій, в умовах надлишку в розплаві силіцію та інших елементів, приводить до утворення оболонки фериту навколо первинного кристаліту графіта. Розвиток інтенсивних дифузійних потоків викликає дифузію атомів вуглецю в металевій матриці. В остаточному підсумку процес росту первинних кристалітів графіту припиняється з утворенням потовщеної оболонки фериту навколо графіту (рисунок 3.3).

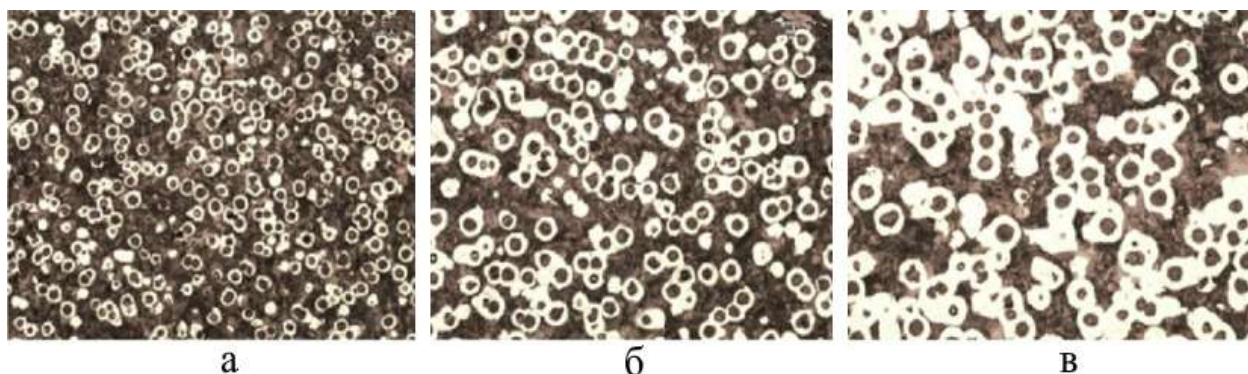


Рисунок 3.3 – Структура ВЧ 50 у виливках (x100). Травлення ніталем

Виділення дрібнодисперсних включень кулястого графіту сприяє покращенню в'язко-пластичних характеристик високоміцного чавуну. Проте, така структура не є оптимальною для показників гасіння вібрацій та демпфірування циклічних навантажень. З іншого, не завжди можливо досягнути оптимальної швидкості охолодження по всьому сеченню виливка,

конструкція якого завжди обмежена конструктивними особливостями та технічним вимогами. Крім того, значна кількість перліту у структурі не сприяє покращенню пластичності чавуну та здатності до досягненню високих пластичних деформацій за умов штампування чи кування. Такі чавуни піддають штампуванню лише за високих температур, тобто гарячому штампуванню.

З іншого боку, існування феритної оболонки навколо кулястих включень графіту позитивно впливає на поведінку чавуну за малих та середніх ступенів пластичної деформації (до 40 %). Ефект оболонки полягає у розсіювання напружень навколо кулястого включення графіту та меншого його спотворення за інтенсивного пластичного течіння. Структурні дослідження показують (рисунок 3.4), що наявність феритної оболонки навколо графіту властива практично всім ділянкам експериментальних виливків.

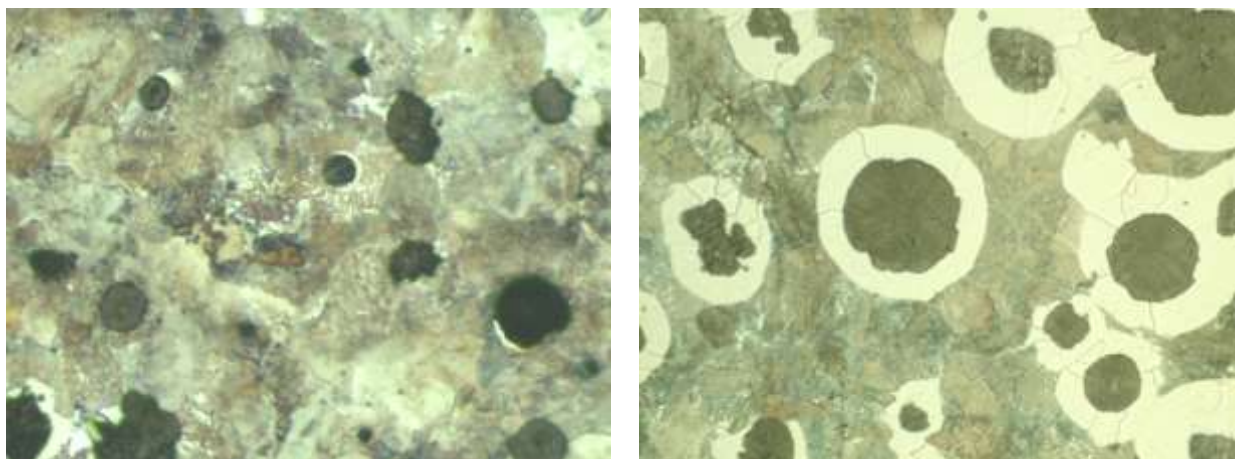


Рисунок 3.4 – Оболонка фериту навколо кулястого графіту (x600): а – зона периферії виливка; б – центральні ділянки виливка

У потовщених зонах, де швидкість охолодження була невисокою, та формувались більші за розміром включення графіту, така оболонка є більш масивною, аж до утворення зон об'єднання феритної фази та формування розгалужених ділянок фериту. Включення компактного або кулястого графіту, як видно мають порівняно більші розміри.

### 3.2. Результати дослідження фазового складу литого чавуну

Зі збільшенням ливарного модуля, тобто товщини стінки, швидкість охолодження зменшується. З одного боку, кількість виділень графіту в матриці чавуну з кулястим графітом збільшується, діаметр графітових кульок збільшується, у той час як швидкість сфероїдизації графіту зменшується і кількість графітових кульок зменшується. З іншого боку, кількість перліту та фериту збільшується у литій структурі. Це показує, що кількість фериту в матриці можна опосередковано охарактеризувати за допомогою ливарного модуля.

Розподіл графіту у високоміцному чавуні, кількість графітових включень, їх розмір, швидкість сфероїдизації та кількість вільного графіту мають значний вплив на структуру матриці та механічні властивості високоміцного чавуну. Серед них середній діаметр та швидкість сфероїдизації графіту є одними з важливих стандартів для вимірювання якості чавуну. Хороший ефект сфероїдизації дозволить отримати високий індекс якості. Ефект сфероїдизації графіту під час тверднення чавуну залежить не лише від його хімічного складу, а й від швидкості охолодження вилівка. Тому відповідно до стандарту металографічного дослідження чавуну з кулястим графітом та за допомогою професійного програмного забезпечення для аналізу зображень PhotoM-1/31 було кількісно проаналізовано морфологію графіту та структуру матриці литого чавуну ВЧ 50 (рисунок 3.5). Серед них точковий графіт діаметром менше 5 мкм не входить до загальної кількості графітових кульок.

Як видно, конструктивними особливостями ливарної форми можна досягати регуляції структурного стану високоміцного чавуну марки ВЧ 50, проте у практиці литва такий підхід важко реалізувати, у наслідок обмежень по формі виробів, що закладені їх конструкцією та призначенням. Тому, неоднорідність структури чавунного литва часто усувають термічною обробкою, або ж застосовують регламентоване легування розплавів.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

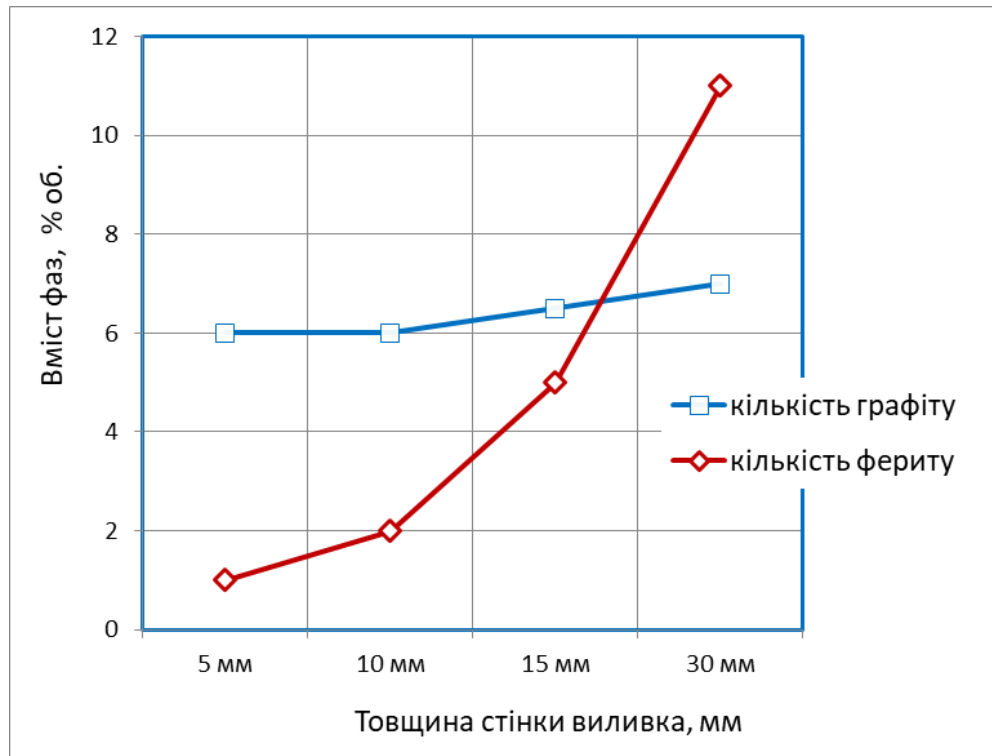


Рисунок 3.5 – Фазовий склад чавуну в залежності від умов кристалізації

Зважаючи на ріст кількості фериту за зменшення швидкості охолодження під час кристалізації чавуну, кількість графітної фази практично не змінюється. Окремо розглядаючи структуру експериментальних виливків встановили, що розмір куль графіту від швидкості кристалізації має більш виражену залежність. Зокрема, вивчаючи дані рисунку 3.6 можна бачити, що при малій зміні кількості графіту, розмір його включень зростає більш інтенсивно при збільшенні товщини стінки виливка. Це вказує на меншу їх кількість у стрижнях більшого діаметру.

Враховуючи особливості кристалізації високоміцних чавунів як складних металевих систем слід відмітити неоднозначний вплив складу та умов кристалізації на морфологію та розподілення у литій структурі чавуну графітної фази. Зокрема, кількість самих включень графіту залежить від кількості центрів кристалізації графіту, що утворились на початку кристалізації. Отже, керуючи цим процесом можна регулювати кількість включень графіту у чавуні.

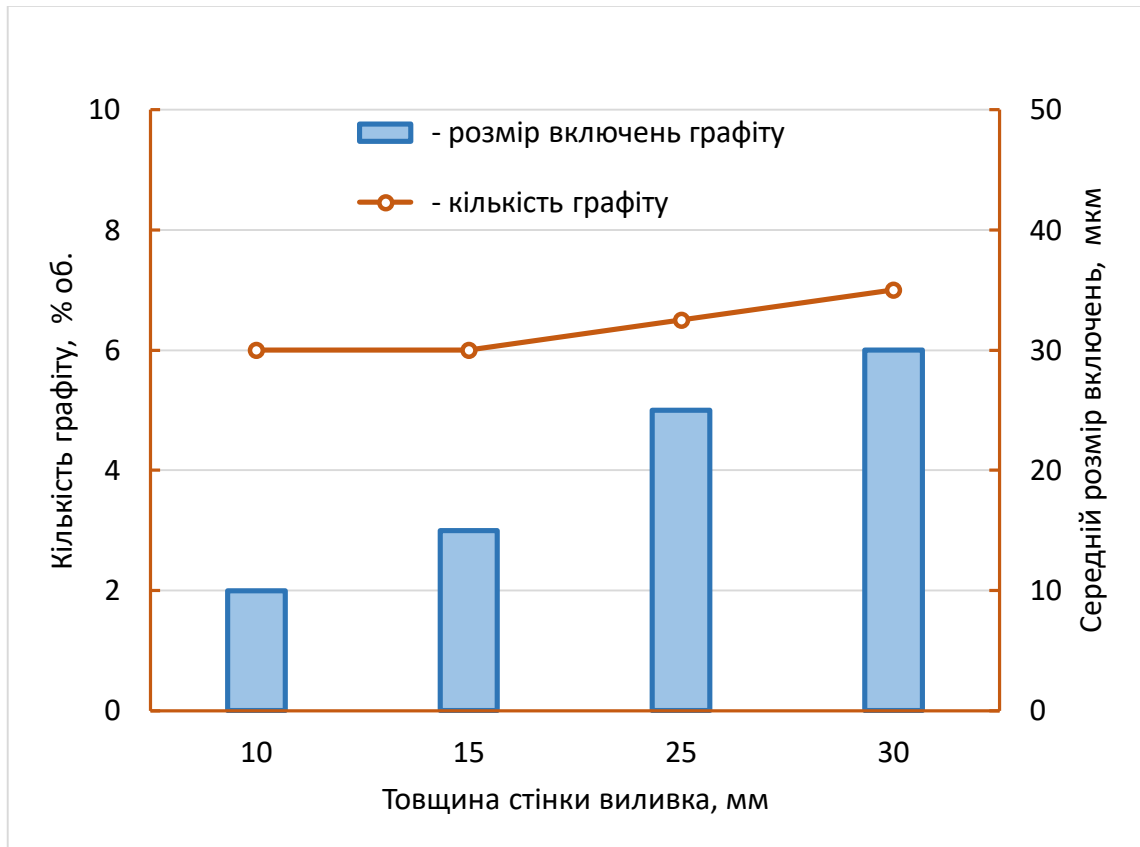


Рисунок 3.6 – Залежність розміру та кількості графіту у виливках чавуну ВЧ 50

Таким чином у масивних ділянках виливків можуть формуватися більш великі включення графіту, що слід враховувати під час проектування конструкцій ливарних форм.

### 3.2. Результати дослідження твердості виливків

Твердість чавунного литва для деталей машинобудування має важливе значення та впливає на ряд як технологічних, так і експлуатаційних характеристик. Від твердості металевої матриці та її стану залежить здатність чавуну до пластичного деформування.

Для високоміцного чавуну марки ВЧ 50, у відповідності до стандарту характерні середні значення твердості, які можуть коливатись у досить широкому інтервалу від 1500 до 2500 МПа за Брінелем. У роботі було важливо отримати значення твердості для різних зон циліндричного виливка. Тому вимірювання проводили за п'ятьма точками для трьох характерних зон:

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40



## РОЗДІЛ 4

### ВПЛИВ ГРАФІТИЗАЦІЇ НА СТРУКТУРУ ВИЛИВКІВ

#### 4.1. Дослідження процесу нормалізації структури чавуну

Нормалізаційний відпал дозволяє покращити структурний стан чавунного литва. Виливки набувають однорідності структури металевої матриці, з переважанням перліту. За проведення нормалізації покращуються більшість важливих властивостей високоміцного чавуну: твердість, в'язкість, міцність, витривалість тощо.

Нормалізацію виливків із сірого, високоміцного та ковкого чавуну проводять при температурі 850...950 °С для розчинення частини графіту в аустеніті з метою отримання перлітного чавуну з феритного або ферито-перлітного чавуну. У випадку нормалізації виливків з високоміцного чавуну частково проходить процес графітизації. Графітизуючий відпал виливків вибіленого і половинчастого чавунів проводять при температурі 900...950 °З витримкою 1...5 год для графітизації цементиту ледебуриту або надлишкового цементиту та отримання структури – перліт + графіт.

Загартування виливків з сірого, високоміцного і ковкого чавунів проводять при нагріванні до температури 850...930 °С з витримкою 0,5...3 год і охолодженням в маслі. мартенсит. Час витримки залежить від маси оброблюваних деталей та структури чавуну. При загартуванні утворюється мартенсит. Після гартування високоміцний чавун піддають відпусканню. Низький відпуск проводять за температури 200...250 °С деталей, які працюють на знос. Чавунні виливки деталей, що не працюють на знос, піддають високій відпустці при температурі 500...600 °С.

Основним завданням нормалізаційного відпалу виливків з високоміцного чавуну ВЧ 50 було врівноваження структури та усунення ледебуритного цементиту (рисунок 4.1), появу якого спричиняє більша швидкість охолодження у процесі кристалізації рідкого чавуну. Це стосується

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

тонкостінних виливків, або ж тих ділянок виливків, де товщина металу менша 10 мм, особливо 5 мм.

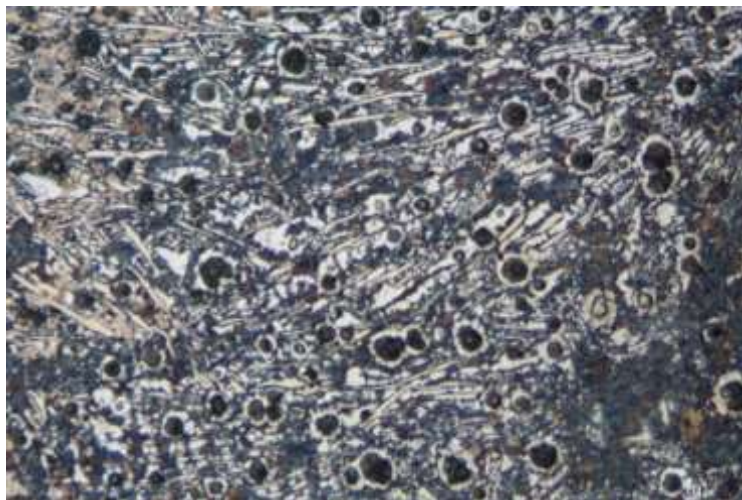


Рисунок 4.1 – Структура литого чавуну ВЧ 50 (x100) в умовах високого переохолодження під час кристалізації

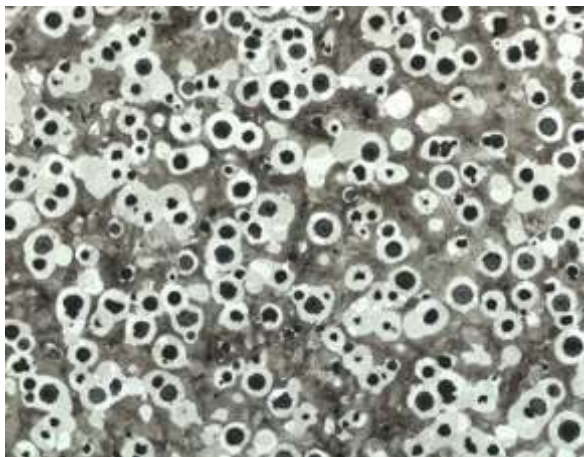
У випадку наявності пластин первинного цементиту у структурі високоміцного чавуну він набуває високої твердості та крихкості, втрачаючи в'язкість та пластичність. Ділянки металу з такою структурою не придатні до пластичної деформації та під час штампування, навіть за високих температур нагріву (900...1050 °С), можуть спричиняти появу тріщин та руйнування заготовок у процесі пластичного деформування.

Для усунення такої структури литого чавуну, виливки доцільно піддавати аустенізації та тривалій витримці для розчинення грубих пластин первинного цементиту, з наступним осадженням надлишкового вуглецю у  $\gamma$ -залізі на вже існуючі включення графіту. Цей процес при порушенні умов, зокрема зменшення тривалості обробки, може викликати погіршення структурного стану чавуну. У більшості випадків останнє пов'язують із виділенням дрібних включень графіту на місцях існування цементитних пластин. Такій графіт називають точковим, він погіршує пластичність та інші механічні характеристики високоміцного чавуну.

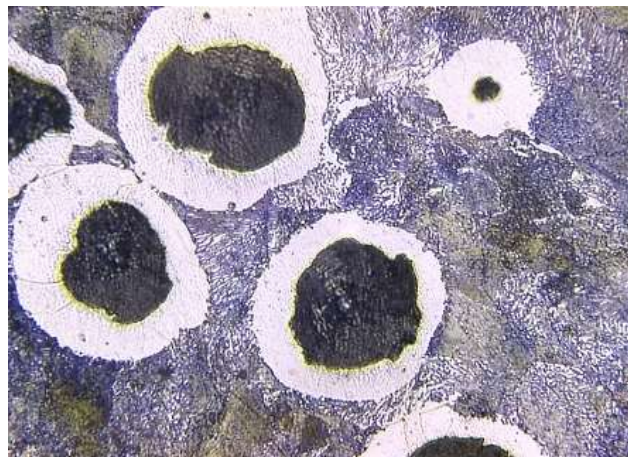
Отже, нормалізаційний відпал експериментальних зразків чавуну здійснювали за прийнятим у другому розділі режимом термічної обробки, з

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

нагрівом до 950...1000 °С, та витримкою за цієї температури протягом 5 годин. Структуру термооброблених зразків (рисунок 4.2) вивчали за різних збільшеннях оптичного мікроскопу.



а



б

Рисунок 4.2 – Структура чавуну ВЧ 50 після нормалізації: а – х100; б – х600

Як видно нормалізація за вибраним режимом дозволяє ефективно усунути кристали первинного цементиту. Також, для ділянок структури виливків, що за характером відповідали типовим для чавуну ВЧ 50, без пластин первинного цементиту, проведена термообробка не змінювала суттєво їх характер. Структура складалась з перлітної матриці та незначної кількості фериту, який традиційно формувався у вигляді оболонки навколо кулястого графіту.

Для ділянок чавуну де феритна оболонка навколо графіту була відсутня, проведення нормалізації спонукало її появу. Тобто, загалом нормалізаційний відпал за прийнятим режимом дозволяв отримати порівняно рівномірну структуру експериментальних виливків з високоміцного чавуну ВЧ 50. Така структура складається з перліту, до 80 % за об'ємом, графіту (7...10 % об.) та фериту (до 10 % об.).

#### 4.2. Вплив графітізуючого відпалу на структуру ВЧ 50

Графітізуючий відпал для чавунів з присутністю графіту у виливках та відсутністю первинного карбіду чи цементиту називають ще відпалом

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

феритизацією. Виконання такої термічної обробки переводить металеву основу чавуну, переважно у феритний стан, з незначною кількістю евтектоїдної суміші перліту.

Графітизуючий відпал сірого і високоміцного чавунів проводять при температурі 680...750 °С витримкою 1...36 годин у залежності від хімічного складу чавуну, а також характеру та ступеня легування. У процесі такого відпалу відбувається графітизація, часткова сфероїдизація евтектоїдного цементиту (у випадку малих витримок до 3 годин), а головне феритизація металевої матриці для зниження міцності, твердості, поліпшення оброблюваності чавуну на металорізальних верстатах і металорізальних верстатах. Повна феритизація структури високоміцного чавуну потребує тривалих витримок за температур відпалу 5...15 годин, іноді до 36 годин для комплексно легованих чавунів.

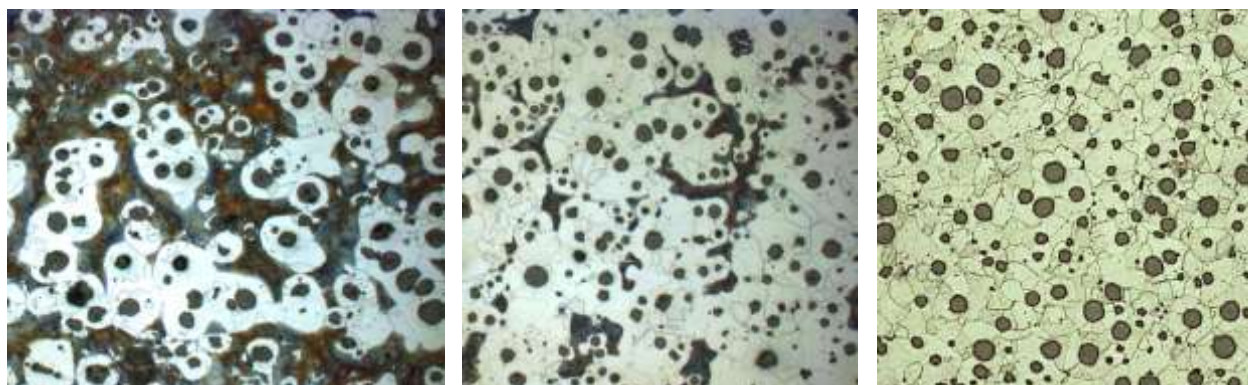
Виконуючи процес феритизації структури високоміцного чавуну марки ВЧ 50 було помічено, що результати відпалу залежать від початкової структури та тривалості витримки. Для зразків, що попередньо піддавали нормалізації час отримання переважної феритної структури металевої матриці є меншим, у порівнянні із литими зразками. Тому для литого чавуну доцільне виконання двох стадійного графітизуючого відпалу, згідно режиму наведеного на рисунку 2.4.

У дослідженнях визначали вплив часу витримки експериментальних зразків литого чавуну на другій стадії відпалу, тобто феритизації. Порівнювали зміну кількості фаз металічної матриці, а саме фериту та перліту. Як видно з наведених структур зразків чавуну на рисунку 4.3 зі збільшенням часу витримки кількість перліту в структурі чавуну зменшується.

Для отримання повністю феритної структури металевої матриці високоміцного чавуну необхідно застосовувати досить тривалі витримки. Процес пов'язаний з дифузією та поступовою сегрегацією атомів вуглецю біля первинних кулястих включень графіту, який вимагає значного часу. Прискорити процес можливо збільшенням температури, але перевищення

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

межі 750 °С, небезпечно початком алотропічного перетворення заліза та формуванням ділянок аустеніту, розчинність вуглецю в якому значно більша.



а

б

в

Рисунок 4.3 – Структури чавуну ВЧ 50 після феритизації (x100), час витримки на стадії феритизації: а – 1 година; б – 5 годин; в – 10 годин

Структурні дослідження показують часткове збільшення графітної фази в зразках чавуну, відпалених за тривалих витримок на стадії феритизації. Це явище можна чітко спостерігати з даних рисунку 4.4. На графіку показана зміна кількості фазових та структурних складових в залежності від часу витримки під час феритизації.

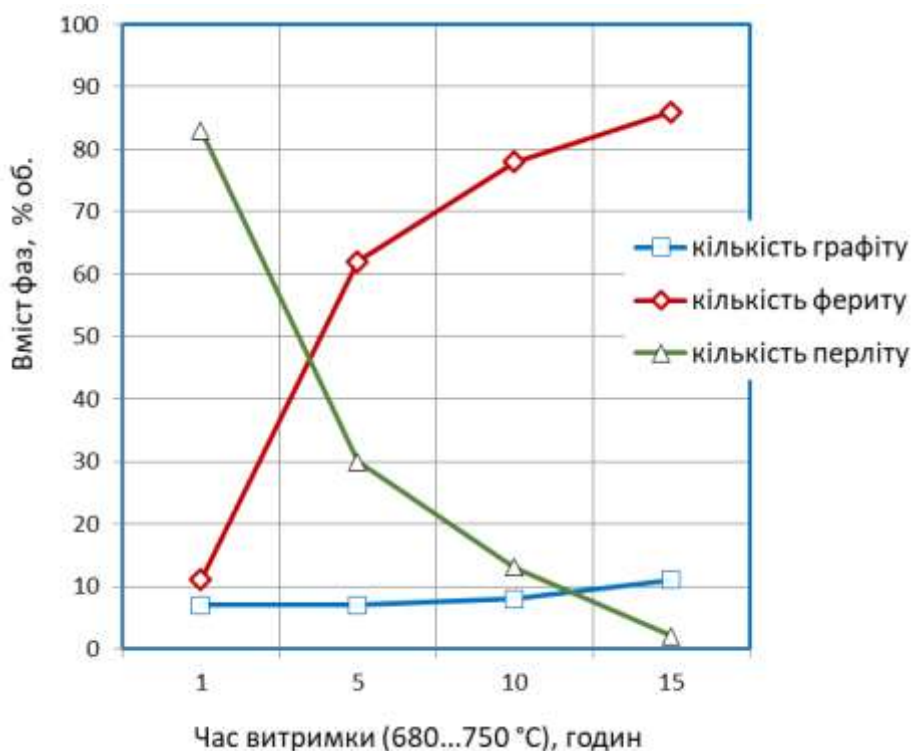


Рисунок 4.4 – Залежність кількості фаз у структурі чавуну від часу витримки у межах евтектоїдного інтервалу

Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

MP 0124.00.00.000 ПЗ

Арк.

46

Дифузія атомів вуглецю до куль графіту завершується їх виділенням, шляхом нашарування на графітові включення надлишкових атомів. Дослідженнями помічено, також, утворення нових дрібних включень графітної фази. Розмір цих включень та їх кількість значно менші за розміри та кількість первинного графіту.

Отже, виконуючи тривалі витримки на другій стадії графітизації виливків з високоміцного чавуну марки ВЧ 50 можна отримати чисто феритну структуру металевої матриці, яка буде мати високу пластичність та здатність до пластичного деформування.

#### 4.3. Твердість чавуну ВЧ 50 після відпалу

Графітизуючий відпал високоміцного чавуну неоднозначно впливає на показники механічних властивостей, за деякими параметрами можуть відбуватись незначні зміни, а деякі показники змінюються суттєво. Основним ефектом є усунення суттєвої нерівномірності механічного стану матеріалу за об'ємом конкретного вилівка.

Після графітизації експериментальних зразків чавуну ВЧ 50 вимірювали їх твердість на торцевих поверхнях, після зачищення шліфуванням. Вимірювання виконували з метою отримання значень твердості матеріалу (таблиця 4.1) після нормалізаційного відпалу та повного відпалу чавуну на структуру фериту металічної основи. Вимірювання здійснювали за п'ятьма окремим точками з наступним усередненням.

Таблиця 4.1 – Значення твердості чавуну ВЧ 50 у виливках, діаметром 30 мм

Термічна обробка	Твердість НВ, МПа					
	№ вимірювання					Усереднене значення
	1	2	3	4	5	
Нормалізація	2150	2170	2120	2200	2110	2150
Феритизація (перліту до 10 % об.)	1820	1900	1880	1850	1860	1850

З даних таблиці видно, що твердість чавуну після виконання відпалу феритизації помітно зменшується в порівнянні з литим станом (рисунок 4.5). Після нормалізації твердість змінюється незначно, проте розброс її значень за січенням вилівка не такий великий як у литому стані.

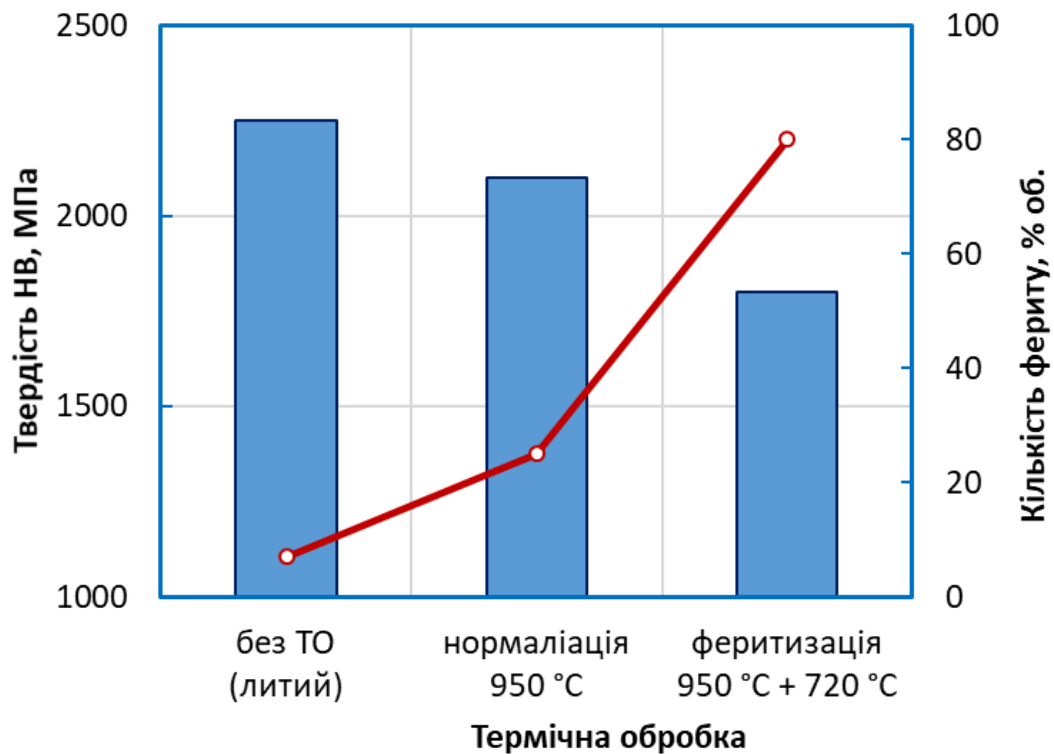


Рисунок 4.5 – Твердість чавуну ВЧ 50 після відпалу

Як видно, повна феритизація викликає зниження твердості чавуну ВЧ 50 нижче 2000 МПа за Брінелем. Це пов'язано із значним збільшенням в структурі чавуну фериту, який має малу твердість. Кількість перліту в структурі металічної матриці не перевищує 10 % за об'ємом, за витримки зразків при температурі феритизації протягом мінімум 4 годин.

Така ситуація сприятиме суттєвому підвищенню пластичності високоміцного чавуну, особливо за умов деформування і обробки куванням без нагріву, чи напівгарячої обробки тиском.

## РОЗДІЛ 5

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ ЧАВУНУ ВЧ 50

#### 5.1. Дослідження процесу деформування виливків

Деформування високоміцного чавуну без відпалювання у литому стані, за звичайних схем навантаження (кування, відкрите штампування), можливе лише з нагрівом до температур гарячої пластичної деформації чорних металів. Деформування у холодному сталі не дозволяє досягнути потрібних ступенів деформації литих зразків, унаслідок їх швидкого руйнування. Особливо це стосується стержневих заготовок з малим діаметром, що кристалізувались прискорено, з утворенням первинного цементиту.

Для виконання звичайних процесів штампування литі зразки піддавали нагріванню до температур фазового переходу перліту матриці чавуну в аустеніт 850, 850, 900, 950 °С. Режим передбачав нагрівання до вказаних температур в індукційному нагрівачі, зі швидкість 30 °С/с, та витримування до 20 хвилин. Деформування здійснювали у термокамері дослідного штампу (див. рисунок 2.7), в якій підтримувалась температура штампування. Зразки деформували змінною пластичною деформацією 20, 40 і 60 % в умовах близьких до ізотермічних. Під час деформування початково циліндричні зразки ( $\varnothing 10 \times 20$  мм) спотворювались до діжкоподібної (рисунок 5.1).

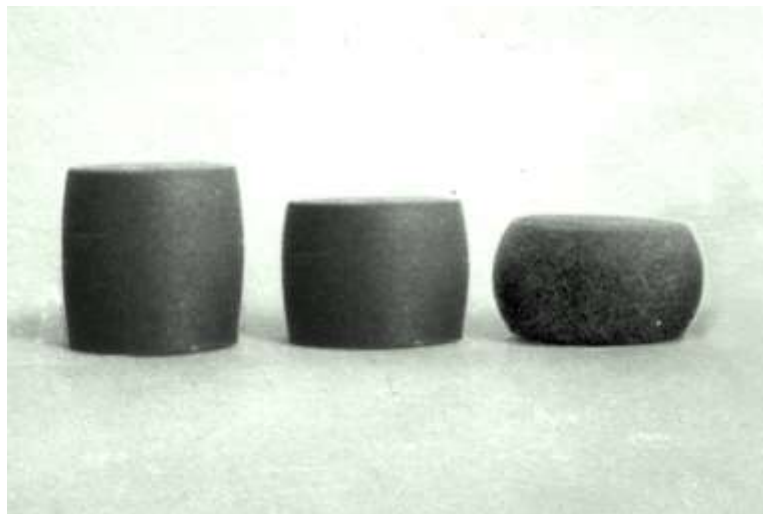


Рисунок 5.1 – Деформовані зразки чавуну ВЧ 50

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Деформування за схемою повздовжнього осаджування здійснювалось між двома жароміцними плитами. У дослідженнях фіксували зусилля преса  $P$  та поточну висоту зразка  $h$ . Результати досліджень проходили попередню обробку та усереднення значень. Середні значення  $P$  та  $h$  для окремої групи зразків для заданої температури заносились в таблиці даних випробувань. Ці дані слугували матеріалом для подальшого розрахунку напруженого стану зразків.

Напруження деформації розраховувалось згідно робіт [14, 15] за формулою для вільного деформування осадкою циліндричного зразка, що враховує коефіцієнт тертя торців по поверхні жароміцних плит штампу:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d_{\text{cp}}} \left( 1 + \mu \frac{D_0}{3H_0} \right),$$

де:  $P$  – зусилля преса;

$\mu$  – коефіцієнт тертя;

$D_0, H_0$  – початкові діаметр та висота зразка;

$d_{\text{cp}}$  – середній діаметр зразка для даного ступеня осадки.

Коефіцієнт тертя  $\mu$  для чавуну при осаджуванні в умовах підвищених температур ( $T > 500$  °C) взято 0,25 за даними [15].

Середній діаметр зразка визначали за формулою:

$$d_{\text{cp}} = D_0 \cdot \sqrt{\frac{H_0}{h}}.$$

Вище наведені формули є основними для обробки експериментальних даних та дозволяють побудувати залежність напружень деформування від ступеня деформації.

З побудованих залежностей напруження деформування від ступеня деформації для різних температур нагріву зразків, видно неоднозначну залежність росту напружень від деформацій (рисунок 5.2). Швидкість деформування під час виконання експерименту не враховували. Основним параметром був ступінь осадки, який вимірювали механічним мікроприладом, що фіксувався до нижньої плити гідравлічного пресу. Пружною ділянкою навантаження нехтували.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

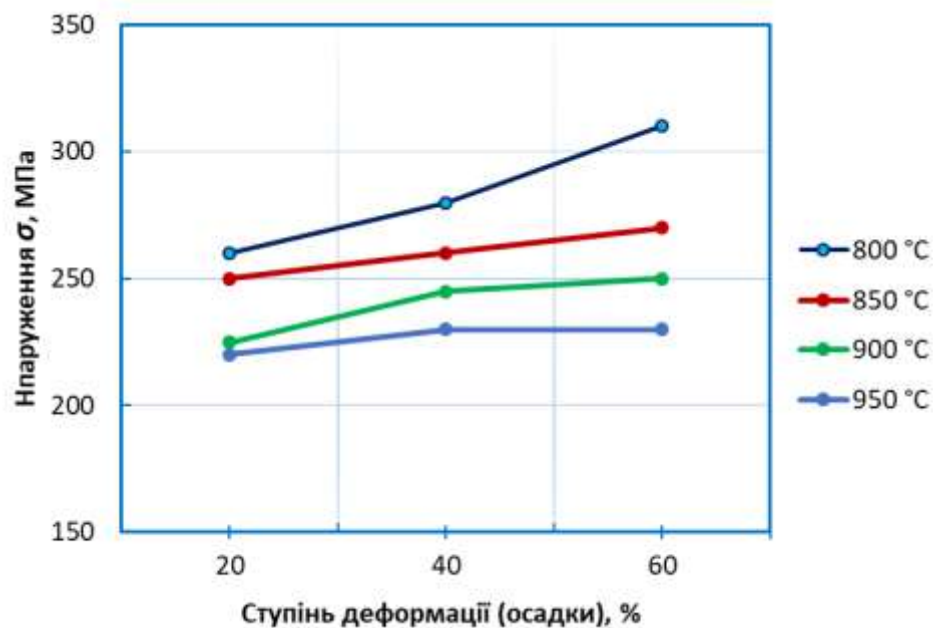


Рисунок 5.2 – Діаграма деформування зразків чавуну ВЧ 50 без термічної обробки

Як видно, з підвищенням температури напруження як початку, так і завершення осаджування зразка зменшуються. Проте, завершення деформування за ступеня 60 % осадки, відповідають більшій різниці напружень від температури деформування. За більших температур можна отримати більше зменшення напруження деформації.

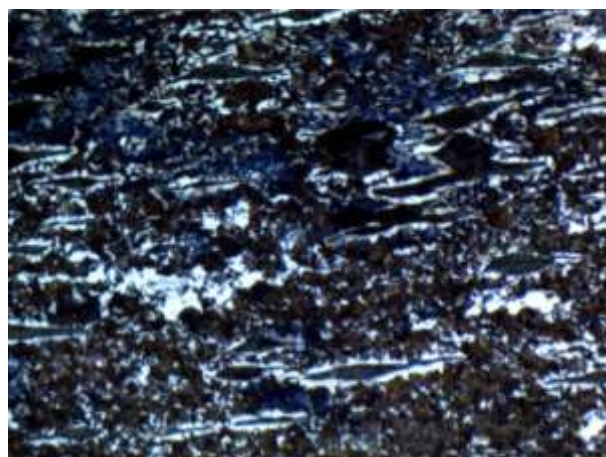
З дослідження структури помітили, що матеріал зразка спочатку деформується в центральній зоні в умовах всебічного стиснення (рисунок 5.3). Напружений стан характеризується комплексною схемою стиснення, яка забезпечується діючою силою в напрямку стиску і реакцією сил тертя в радіальному напрямку до її осі. Схема напруженого стану не змінюється протягом усього процесу деформування; максимальне напруження в кінці процесу має значення 250...310 МПа. Течіння металу відбувається в обох напрямках від центру в радіальному напрямку.

Встановлено, що завдяки пластичній деформації зразків форма включень графіту змінюється в напрямку, паралельному прикладеній силі, порівняно з литою структурою. Процес деформації при високих температурах, а саме 950 °C та 900 °C, призводить до зміни форми графіту зі сфероїдальної

на блюдеподібну. Однак при зниженні температури деформації до 850 °С, а також до 800 °С спостерігається графіт пластинчастої форми.



а



б

Рисунок 5.3 – Мікроструктура литих зразків чавуну ВЧ 50 (x250), деформованих осадкою ( $T=950$  °С): а –  $\epsilon=40$  %; б –  $\epsilon=60$  %

При деформуванні зерна металеві основи та включення графіту змінюють свою форму та орієнтування, утворюючи веретеноподібну структуру з переважною спрямованістю графіту вздовж осі видавлювання. При значних ступенях деформації відбувається розворот безладно орієнтованих зерен осями найбільшої міцності вздовж напрямку течії металу. Зерна деформуються і сплющуються, витягуються у бік діючих сил, утворюючи волокнисту структуру.

## 5.2. Вплив нормалізації на пластичність зразків

Після нормалізації структури високоміцного чавуну ВЧ 50 характер його гарячої пластичної деформації змінюються. У структурі розподіл перліту є більш рівномірним, це покращує пластичне течіння металу. Крім того, продукти розпаду аустеніту за нормалізації є більш дрібнодисперсними та однорідними, що прискорює динамічні процеси перекристалізації за температур аустенізації – 850...950 °С. Відповідно, це сприяє зменшенню опору металеві основи навантаженню та зменшує поріг переходу металу у пластичний стан.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

Як видно з представлених на рисунку 5.4 кривих деформації зразків нормалізованого високоміцного чавуну, напруження деформації мають дещо менші значення в порівнянні з литими зразками. Це також може бути пов'язане з більшою кількістю феритної фази у металевій матриці чавуну. Ділянки фериту присутні переважно навколо первинних кристалітів графіту кулястої форми, що може зменшувати їх спотворення.

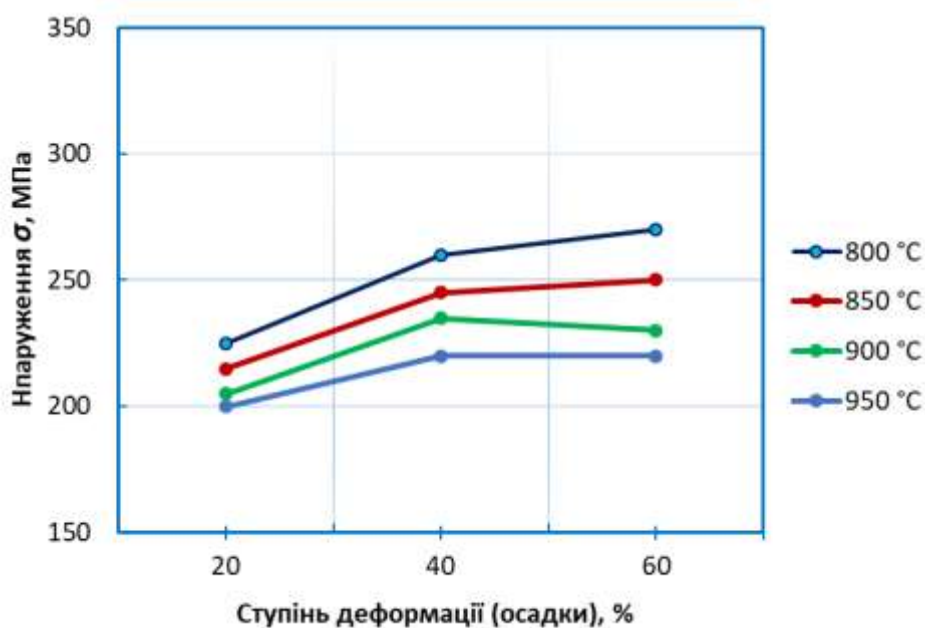


Рисунок 5.4 – Діаграма деформування зразків чавуну ВЧ 50 після нормалізації

Мікроструктурний аналіз деформованих зразків нормалізованого високоміцного чавуну (рисунок 5.5) показав помірне спотворення включень графіту.

Як видно за гарячої пластичної деформації чавуну основні структурні зміни пов'язані зі спотворенням форми графіту. Включення графіту у нормалізованому високоміцному чавуні набувають сплюсненої тарілчастої форми. Проте, ступінь такого спотворення порівняно менша, за всіх ступенях деформації, ніж у випадку гарячої деформації термічно необробленого литого чавуну. Рівень видовження графіту у напрямку пластичного течіння значно менший, що дозволяє зберегти компакту форму включень, навіть за великих ступенів осадки.



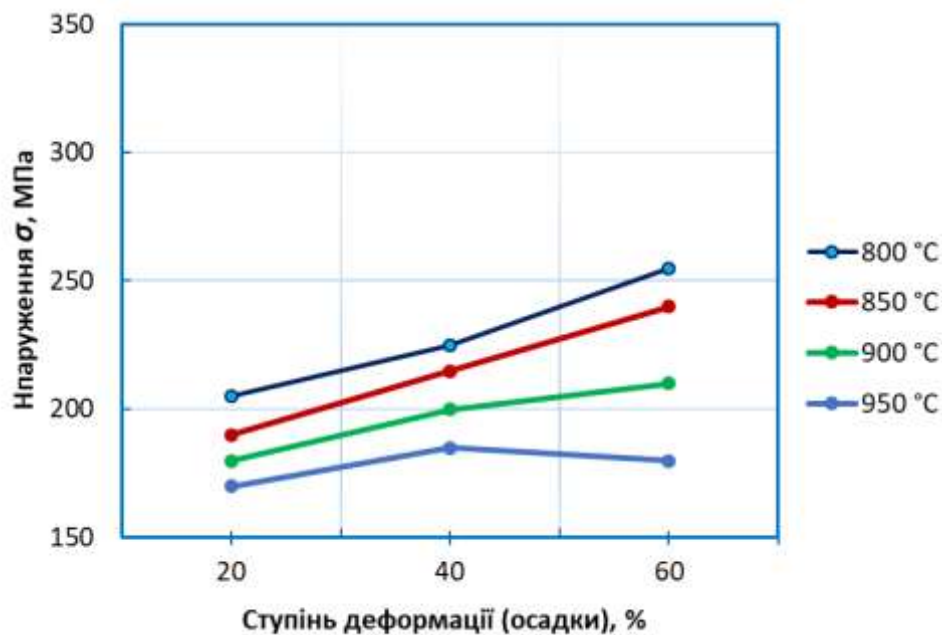
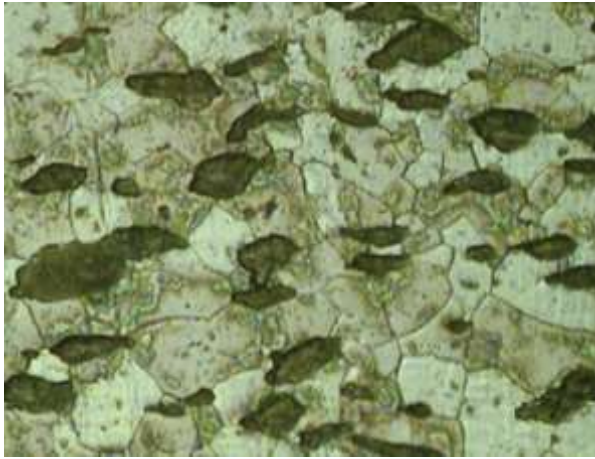


Рисунок 5.6 – Діаграма деформування зразків чавуну ВЧ 50 після феритизації

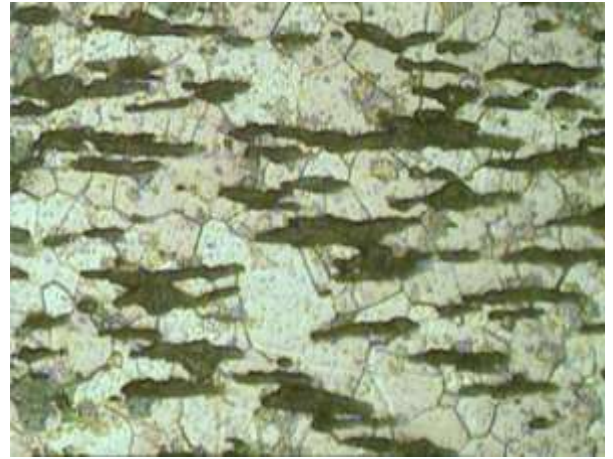
З отриманих залежностей напружень феритного чавуну від ступеня деформації видно, що при великих ступенях деформування 60 %, значення напружень для зразків, які деформувались за різних температур значно відрізняються. При невисоких температурах гарячої деформації до 900 °C напруження осадки зростає, навпаки за вищих температур (950 °C) залежність має спадний характер. Така ситуація вказує на часткове зміцнення високоміцного феритного чавуну за температур деформування 800, 850 °C.

Таке явище можна пояснити домінуванням фериту у структурі металевої матриці. Як відомо ферит чавунів зазнає фазового перетворення за вищих температур, ніж перліт як дисперсна евтектоїдна суміш. Крім того, ферит, як фаза, що має ОЦК ґратку, здатний до інтенсивного наклепування. Тому, у межах температур, за яких відсутнє або нерозвинене фазове перетворення металевої основи на аустеніт, спостерігається часткове її зміцнення та ріст напруження деформування.

У структурі деформованих зразків високоміцного чавуну ВЧ 50 з феритною матрицею також помітні спотворення кулястого графіту до витягнутої форми (рисунок 5.7).



а



б

Рисунок 5.7 – Мікроструктура феритних зразків чавуну ВЧ 50 (x250), деформованих осадкою ( $T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ): а –  $\varepsilon=40\%$ ; б –  $\varepsilon=60\%$

За малих та середніх ступенів пластичної деформації спотворення кулястого графіту у феритних чавунах є незначними. Графітні включення мають незначну еліпсоїдну форму, яка витягнута більшою віссю за напрямком пластичного течіння металу.

Більш значних спотворень включень графіту феритного чавуну можна спостерігати за великих ступенів деформації. Зокрема, як видно на представлених мікроструктурах, для 60 % осадки зразка, графіт помітно витягується у напрямку течії металу. Показаний характер спотворення структури властивий для найбільш інтенсивних ділянок пластичної деформації, що розташовані у середній зоні осадженого зразка.

На фоні спотвореного графіту можна бачити практично недеформовану структуру фериту металеві матриці. Це вказує на те, що при гарячій пластичній деформації за високих температур (більше  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), мають місце процеси перекристалізації та рекристалізації. Деформаційні процеси відбуваються в аустеніті чавуну, який під час охолодження трансформується у феритну фазу, з рівноосною рівноважною структурою.

## ВИСНОВКИ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

У магістерській роботі виконані дослідження структури та властивостей зразків з високоміцного чавуну марки ВЧ 50 у стані литва та після термічної обробки і гарячої пластичної деформації. На основі цих досліджень запропоновано оптимальну структуру заготовок з цього конструкційного матеріалу для виготовлення фасонних виробів машинобудування з використанням процесів гарячого штампування.

Встановлено, що за звичайних технологічних методів литва структура чавуну ВЧ 50 залежить від товщини стінки виливків, або від діаметру, для випадку виготовлення виливків циліндричної форми. За вибраного хімічного складу чавуну ( $C_{3,2...3,5\%}$ ;  $Si_{2,7...3,2\%}$ ;  $Mn_{0,2...0,5\%}$ ;  $P \leq 0,1\%$ ;  $S \leq 0,02\%$ ;  $Cr \leq 0,1\%$ ;  $Cu_{0,5...0,7\%}$ ;  $Mo \leq 0,5\%$ ;  $Mg_{0,05\%}$ ) у всіх зразках виливків спостерігалась присутність графіту правильної кулястої форми, з розмірами куль до 50 мкм. За товщини стінки вливка менше 10 мм можливе формування в структурі металевої основи чавуну грубих включень первинного карбїду, цементиту, у вигляді пластин видовженої форми. Цей факт виявлений структурними дослідженнями зразків. Для уникнення цього явища слід застосовувати спеціальні формувальні суміші, що зменшують відвід тепла від тонкостінних ділянок фасонних виливків та сприяють більш рівномірній кристалізації металевої матриці.

У роботі проведено дослідження процесу термічної обробки литого чавуну ВЧ 50, яка полягала у проведенні нормалізаційного відпалу та фідпалу на структуру фериту металевої матриці чавуну.

У результаті проведених досліджень встановлено, що нормалізаційний відпал за температур аустенізації 950...1000 °C з витримкою до 3 годин, покращує структурний стан чавунного литва, сприяючи формуванню більш однорідної структури металевої матриці. Проведення такого відпалу незначно збільшує кількість графітної фази в чавуні. Тривалі витримки під час аустенізації приводять до формування більш виражених полів фериту навколо

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		57

первинного графіту кулястої форми. За вибраних умов нормалізації середня твердість чавуну становить 2100 МПа за Брінелем, що не набагато менше від значень твердості литих зразків. Проте, розподіл твердості за об'ємом виливка є більш рівномірним.

Дослідженнями результатів повного відпалу високоміцного чавуну, встановили, що для формування чисто феритної структури металевої матриці необхідні досить тривалі витримки зразків у межах температур евтектоїдного перетворення. Повне розчинення евтектоїдної суміші є досить тривалим процесом та часто не являється виправданим завданням для покращення пластичності чавунного литва, особливо, у випадках гарячої пластичної деформації. Залишки перліту до 25 % у структурі практично не впливають на основні показники механічних властивостей високоміцного чавуну. Більший вплив мають вторинні виділення графітної фази, що нашаровується вже існуючі кулясті включення графіту, а також виділяючись у вільній формі як новоутворення.

У результаті випробувань на стиск циліндричних зразків чавуну як у литому, так у термообробленому стані, встановили підвищення здатності до гарячої пластичної деформації високоміцного чавуну ВЧ 50 після нормалізації та феритизації структури його металевої основи.

Процес виконували за схемою звичайної осадки, що гарно моделює звичайні процеси гарячого штампування фасонних заготовок. В результаті таких досліджень встановили, що найбільшій рівномірності процесу деформації чавуну можна досягнути після поєднання нормалізаційного відпалювання за температур 950 °С та витримки 3 години, з наступною феритизацією структури за температур 680...720 °С, протягом 5 годин. За такої термічної обробки у литих заготовках чавуну ВЧ 50 формується найбільш оптимальна структура для застосування процесів гарячого штампування з метою виготовлення якісних поковок машинобудівного призначення.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cast Iron Science and Technology, ASM Handbook, Edited By Doru M. Stefanescu, ASM International, 2017, V. 1A, <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v01a.a0006315>.
2. Савуляк, В. І., Янченко О. Б. Економічні технології високоміцних графітизованих сплавів заліза : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2014. – 160 с.
3. Кропівний В.М., Босий М.В., Кузик, О.В. Кропівна А.В. До питання структуроутворення високоміцного чавуну при використанні діаграм стану систем «Fe-Si», «Mg-Si» та «Fe-Si-Mg». Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2023. Col. 7 (38). P. II. P. 34–42. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7\(38\).2.34-42](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.7(38).2.34-42).
4. ДСТУ EN 1563:2015 Литво. Чавун з кулястим графітом. Технічні умови (EN 1563:2011, IDT). URL: [http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id\\_doc=63675](http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=63675).
5. ДСТУ 3925-99 "Чавун з кулястим графітом для виливків. Марки".
6. Vasylykiv V., Danylchenko L., Radyk D. Technological methods of workpieces manufacturing. Metal Casting: Manual / V. Vasylykiv, L. Danylchenko, D. Radyk. Edited by L. Dzhydzhora. – Ternopil: Vector, 2021. – 203 p.
7. Fredriksson H. On the solidification of nodular cast iron and its relation to the expansion and contraction / H. Fredriksson, J. Stjerndahl, J. Tinoco // Mater. Sci. Eng. – 2015. – Vol. 413. – P. 363–372.
8. Pietrowski S. Crystallisation of ductile cast iron with Mo, Cr, Cu and Ni / S. Pietrowski, G. Gumienny // Archives of Foundry. – 2016. – Vol. 6 (22). – P. 406–415. Леговані.
9. Металознавство: навчальний посібник / І. В. Прокопович. – Одеса: Екологія, 2020. – 308 с.
10. Високоміцний чавун зі зміцненим кремнієм та нікелем  $\alpha$ -твердим розчином / В.Б. Бубликов, А.В. Нарівський, Ю.Д. Бачинський, О.О. Ясинський. - Металл и литье Украины, 2018. - № 7-8. - С. 7-13.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

11. Kaboli-Mallak, S.K., Kheirkhahan, N., Edalati, E. et al. On the Morphology Variation of Graphite in Ductile Cast Iron through Severe Plastic Deformation. Phys. Metals Metallogr. 124, 1813–1825 (2023). <https://doi.org/10.1134/S0031918X23601312>.

12. M. Faisal, E. El-Shenawy, and M. A. Taha, “Effect of deformation parameters on microstructural evolution of GGG 40 spheroidal graphite cast iron alloy,” Mater. Sci. Appl. 10, 433–450 (2019). <https://doi.org/10.4236/msa.2019.106032>.

13. Baer, W. Chunky Graphite in Ferritic Spheroidal Graphite Cast Iron: Formation, Prevention, Characterization, Impact on Properties: An Overview. Inter Metalcast 14, 454–488 (2020). <https://doi.org/10.1007/s40962-019-00363-8>.

14. Heidari, E., Mohammadzadeh, M. & Boutorabi, S.M.A. Hot Rolling of Thin-Wall Ductile Cast Iron Produced by Ablation Casting. Inter Metalcast 17, 1637–1649 (2023). <https://doi.org/10.1007/s40962-022-00878-7>.

15. Структурування гетерофазних сплавів на основі чавунів, легованих міддю: колективна монографія / Д.А. Гусачук, І.О. Парфентьєва, М.В. Дмитріюк, Ю.П. Фещук. – Луцьк : ЛНТУ, 2022. – 187 с.

					MP 0124.00.00.000 ПЗ	Арк.
Вим.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60