

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Механіко-технологічний факультет  
Кафедра матеріалознавства та ливарного виробництва

«Допущено до захисту»  
Зав. кафедри МЛВ  
канд. техн. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Олександр КУЗИК  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

**за другим (магістерським) рівнем вищої освіти на тему:**  
**Аналіз впливу структури високоміцного чавуну**  
**на його твердість**

Виконав здобувач вищої освіти  
II курсу, групи ПМ-24М-1  
спеціальності 131  
«Прикладна механіка»  
\_\_\_\_\_ Олександр ПЕТРЕНКО  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Керівник магістерської роботи  
Старший викладач  
\_\_\_\_\_ Микола БОСИЙ  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Рецензент  
канд. ф.-м. наук, доцент  
\_\_\_\_\_ Володимир ПИРОГОВ  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Центральноукраїнський національний технічний університет**

Факультет: механіко-технологічний

Кафедра: матеріалознавства та ливарного виробництва

Рівень вищої освіти: другий (магістерський)

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма: «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри МЛВ

канд. техн. наук, доцент

\_\_\_\_\_ Олександр КУЗИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

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

**Петренка Олександра Олександровича**

1. Тема роботи: Аналіз впливу структури високоміцного чавуну на його твердість.

2. Керівник роботи: Босий Микола Вікторович старший викладач

3. Строк подання роботи до захисту: « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи.

Мета: вивчення впливу структури на твердість високоміцного чавуну.

Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методикку досліджень; виконати дослідження та провести аналіз отриманих результатів.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури		
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу		
3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення кері-		

	внику		
4	Усунення недоліків, написання останнього варіанта тексту		
5	Перевірка роботи на плагіат		
6	Зовнішнє рецензування роботи		
7	Захист випускної кваліфікаційної роботи на засіданні екзаменаційної комісії		

Дата видачі завдання

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Підпис керівника

\_\_\_\_\_ Микола БОСИЙ

Завдання прийнято до виконання

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_ Олександр ПЕТРЕНКО

## ЗМІСТ

	стор
ВСТУП .....	10
РОЗДІЛ 1. ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ .....	12
1.1. Розгляд впливу структури на твердість високоміцного чавуну.....	12
1.2. Розгляд впливу діаметра графітних включень та величини зерна на твердість високоміцного чавуну.....	13
1.3. Розгляд впливу між різними показниками механічних властивостей високоміцного чавуну.....	15
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	16
2.1. Об'єкт і предмет дослідження .....	16
2.2. Методика і матеріал дослідження .....	16
2.3. Методика визначення залежностей впливу структури високоміцного чавуну на його твердість .....	16
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВЛИВУ СТРУКТУРИ ФЕРИТНОГО ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО МІЦНІСТЬ .....	23
3.1. Ефект впливу структури високоміцного чавуну на твердість (методом кореляції для залежності твердості високоміцного чавуну від структури) .....	23
3.1.1. Ефект впливу кількості виділень графіту ( $N_{гр}$ ) на твердість високоміцного чавуну .....	25
3.1.2. Ефект впливу діаметра виділень графіту на твердість феритного високоміцного чавуну.....	29
3.1.3. Ефект впливу вмісту перліту на твердість високоміцного чавуну .....	33
3.1.4. Ефект впливу середнього діаметра зерна фериту на твердість високоміцного чавуну.....	35
3.1.5. Отримання рівняння множинної кореляції твердості від структури високоміцного чавуну .....	39
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....	57

4.1. Оцінка впливу кількості виділинь графіту на твердість високоміцного чавуну .....	57
4.2. Оцінка впливу діаметра графітних вкляючень на твердість високоміцного чавуну .....	58
4.3. Оцінка впливу вмісту перліту на твердість високоміцного чавуну.....	59
4.4. Оцінка впливу розміру феритного зерна на твердість високоміцного чавуну .....	60
4.5. Оцінка впливу діаметра графітних вкляючень на їх число .....	61
4.6. Оцінка впливу кількості вкляючень графіту на вміст перліту у високоміцному чавуні.....	62
4.7. Оцінка впливу числа вкляючень графіту на розмір зерна фериту.....	63
4.8. Оцінка впливу вмісту перліту на середній діаметр графітних вкляючень.. .....	64
4.9. Оцінка впливу вмісту перліту на розмір феритного зерна високоміцного чавуну .....	65
4.10. Оцінка впливу розміру феритного зерна на діаметр виділень графіту високоміцного чавуну.....	65
ВИСНОВКИ .....	66
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	67
ДОДАТКИ.....	70
Додаток 1. Довідка про публікацію.....	71

## АНОТАЦІЯ

Петренко О.О. Аналіз впливу структури високоміцного чавуну на його твердість, спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025. 71 с. Матеріали ілюстрації 10 іл.

Метою даного дослідження є вивчення впливу структури високоміцного чавуну на його твердість. Дослідження проводились згідно методами математичної статистики, кореляційним аналізом в середовищі Microsoft Office Excel та MathCADa.

Проведені наступні дослідження: перше, вплив кількості виділень графіту на твердість високоміцного чавуну; друге, вплив діаметра графітних включень високоміцного чавуну на твердість; третє, вплив вмісту перліту на твердість високоміцного чавуну; четверте, вплив розміру феритного зерна на твердість високоміцного чавуну; п'яте, вплив діаметра графітних включень на їх число; шосте, вплив кількості включень графіту на вміст перліту у високоміцному чавуні; сьоме, вплив числа включень графіту на розмір зерна фериту; восьме, вплив вмісту перліту на середній діаметр графітних включень; дев'яте вплив вмісту перліту на розмір феритного зерна високоміцного чавуну; десяте, вплив розміру феритного зерна на діаметр виділень графіту високоміцного чавуну. Отримано рівняння множинної кореляції залежності твердості від структури високоміцного чавуну.

З'ясовано, що при збільшенні розміру графітних включень до 85 мкм збільшується твердість високоміцного чавуну, а якщо графітні включення будуть більше 85 мкм твердість починає знижуватися. При дослідженні твердість високоміцного чавуну знижується зі збільшенням числа графітних включень та підвищується зі збільшенням вмісту перліту, а також знижується зі збільшенням розміру феритного зерна більше 45 мкм. Твердість високоміцного чавуну знижується зі збільшенням числа графітних включень на  $1 \text{ мм}^2$ . Твердість високоміцного чавуну підвищується зі збільшенням вмісту перліту. Зі зростанням числа графітних включень вміст перліту знижується. При вміс-

ті перліту до 10% зі зростанням кількості перліту розмір графітних включень збільшується.

**високоміцний чавун, твердість, метод нормального розподілу, кореляція, рівняння регресії**

## ABSTRACT

Petrenko O.O. Analysis of the influence of the structure of high-strength cast iron on its hardness, specialty 131 "Applied Mechanics", OPP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025. 71 p. Illustration materials 10 ill.

The purpose of this study is to study the influence of the structure of high-strength cast iron on its hardness. The studies were carried out, of course, by methods of mathematical statistics, correlation analysis in the Microsoft Office Excel and MathCAD environments.

The following studies were conducted: first, the influence of the number of graphite inclusions on the hardness of high-strength cast iron; second, the influence of the diameter of graphite inclusions of high-strength cast iron on the hardness; third, the influence of the pearlite content on the hardness of high-strength cast iron; fourth, the influence of the size of ferrite grains on the hardness of high-strength cast iron; fifth, the influence of the diameter of graphite inclusions on their number; sixth, the effect of the number of graphite inclusions on the pearlite content in high-strength cast iron; seventh, the effect of the number of graphite inclusions on the ferrite grain size; eighth, the effect of the pearlite content on the average diameter of graphite inclusions; ninth, the effect of the pearlite content on the ferrite grain size of high-strength cast iron; tenth, the effect of the ferrite grain size on the diameter of graphite precipitates of high-strength cast iron. The equation of multiple correlation of the dependence of hardness on the structure of high-strength cast iron is obtained.

It was found that with an increase in the size of graphite inclusions to 85  $\mu\text{m}$ , the hardness of high-strength cast iron increases, and if the graphite inclusions are more than 85  $\mu\text{m}$ , the hardness begins to decrease. In the study, the hardness of high-strength cast iron decreases with an increase in the number of graphite inclusions and increases with an increase in the pearlite content, and also decreases with an increase in the ferrite grain size of more than 45  $\mu\text{m}$ . The hardness of high-strength cast iron decreases with an increase in the number of graphite inclusions

per 1 mm<sup>2</sup>. The hardness of high-strength cast iron increases with an increase in the pearlite content. With an increase in the number of graphite inclusions, the pearlite content decreases. At a pearlite content of up to 10%, the size of the graphite inclusions increases with an increase in the amount of pearlite.

**high-strength cast iron, hardness, normal distribution method, correlation, regression equation**

## ВСТУП

### Актуальність теми

Високоміцний чавун має кулясту форму графіту за своїми властивостями пластичністю, міцністю, твердістю та стійкістю до впливу навколишнього середовища перевершує інші види чавуну та стійкий до зношування, а також володіє добрими ливарними властивостями [1-5].

Тому, застосування виливків із високоміцного чавуну на виробництві пов'язано із виготовленням таких деталей машин і механізмів, як корпуси коробок передач, поршневі кільця, шестерні, колінчасті вали, блоки циліндрів, різні кріплення, труби [1-9].

Натепер зростає інтерес до феритного високоміцного чавуну, особливо це стосується формування його властивостей і структури.

Дослідження властивостей феритного високоміцного чавуну, які залежать від структури, наразі є актуальною проблемою [1-5].

На даний час недостатньо уваги приділяють процесам формування структури, особливо твердості феритного високоміцного чавуну. Отже, треба приділяти увагу не тільки вивченню процесів лиття феритного високоміцного чавуну, а також процесів, які пов'язані з теорією утворення та кристалізацією [1-9].

При отриманні феритного високоміцного чавуну надається вагоме значення відповідним прийомам і методам структуроутворення.

Для дослідження феритного високоміцного чавуну необхідно визначати оптимальні технологічні параметри, за допомогою них можна регулювати структуру феритного високоміцного чавуну при покращенні його якості і звісно зниження вартості.

На сучасному етапі дослідження впливу структури феритного високоміцного чавуну на його твердість нині є актуальним питанням. Дослідження високоміцного чавуну направлені, в першу чергу, на підвищення його механічних властивостей в залежності від структури чавуну, що сприяє використанню його в більшості галузей виробництва, особливо в машинобудуванні.

## **Мета та задачі дослідження**

*Метою дослідження є вивчення впливу структури феритного високоміцного чавуну на твердість.*

*Вирішення наступних задач:*

- дослідити вплив діаметра графітних включень на твердість феритного високоміцного чавуну;
- оцінити вплив кількості виділень графіту на твердість феритного високоміцного чавуну;
- встановити вплив вмісту перліту на міцність феритного високоміцного чавуну;
- визначити вплив розміру феритного зерна на твердість феритного високоміцного чавуну;
- знайти рівняння множинної кореляції залежності твердості від структури високоміцного чавуну;
- провести розподіл значень показників, які характеризують структуру високоміцного чавуну.

## **Об'єкт і предмет дослідження**

*Об'єктом дослідження є феритний високоміцний чавун. Предметом дослідження є вивчення впливу структури на твердість феритного високоміцного чавуну.*

## **Наукова новизна одержаних результатів**

Вперше вивчено вплив структури на твердість феритного високоміцного чавуну наступного складу:  $C = 3,3-3,8\%$ ;  $Si = 1,9-2,6\%$ ;  $Mn = 0,20-0,60\%$ ; до  $0,02\%$   $S$ . З'ясовано, що із структурних складових суттєвий вплив на твердість феритного високоміцного чавуну має вміст перліту.

## **Практичне значення отриманих результатів**

Виконане дослідження, що стосується впливу структури феритного високоміцного чавуну на його твердість показує, що значний вплив на його

твердість має, як форма графітових включень, так і їх розмір, а також вміст перліту.

### **Апробація результатів роботи**

Результати роботи доповідались та опубліковані в 2025 році у збірнику наукових праць на 1-й Міжнародній науково-практичній конференції «Current Challenges in Scientific Research», 6-8 жовтня 2025 Вроцлав, Польща. Отримано сертифікат (див. Додаток 1).

## РОЗДІЛ 1. ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

### 1.1. Розгляд впливу структури високоміцного чавуну на його твердість

Високоміцний чавун з різною структурною складовою має різні механічні властивості. Співвідношення між механічними властивостями високоміцного чавуну наведено в табл. 1.1 [8-10].

Таблиця 1.1

Структурні складові високоміцного чавуну і їх властивості

Структурна складова	Механічні властивості	
	$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	НВ
Перліт	59,1	160-210
Ферит	46,2	120-170

При аналізі даних по підборі співвідношення між кількістю перліту і фериту, одержуємо звичайно високоміцний чавун з оптимальним співвідношенням твердості та міцності. Твердість високоміцного чавуну підвищується із зменшенням вмісту С, але це може впливати і на пластичні властивості.

Суттєвий вплив на механічні властивості високоміцного чавуну має структура виливків з чавуну. Графітова фаза є основним фактором, завдяки їй порушується щільність самої металевої матриці.

Деякі автори стверджують, що при зменшенні розміру графітних включень збільшується одночасно твердість і пластичність, це і є особливістю феритного високоміцного чавуну, він відрізняється звичайно від інших сплавів та металів на основі заліза [11-14].

Твердість високоміцного чавуну звичайно знижується з збільшенням числа графітних включень і підвищується з збільшенням вмісту перліту, а також буде знижуватися з збільшенням розміру феритного зерна більше 45 мкм.

## 1.2. Розгляд впливу діаметра графітних включень та величини зерна на твердість високоміцного чавуну

На твердість високоміцного чавуну суттєвий вплив має форма графітних включень, як видно із рис. 1. 1.

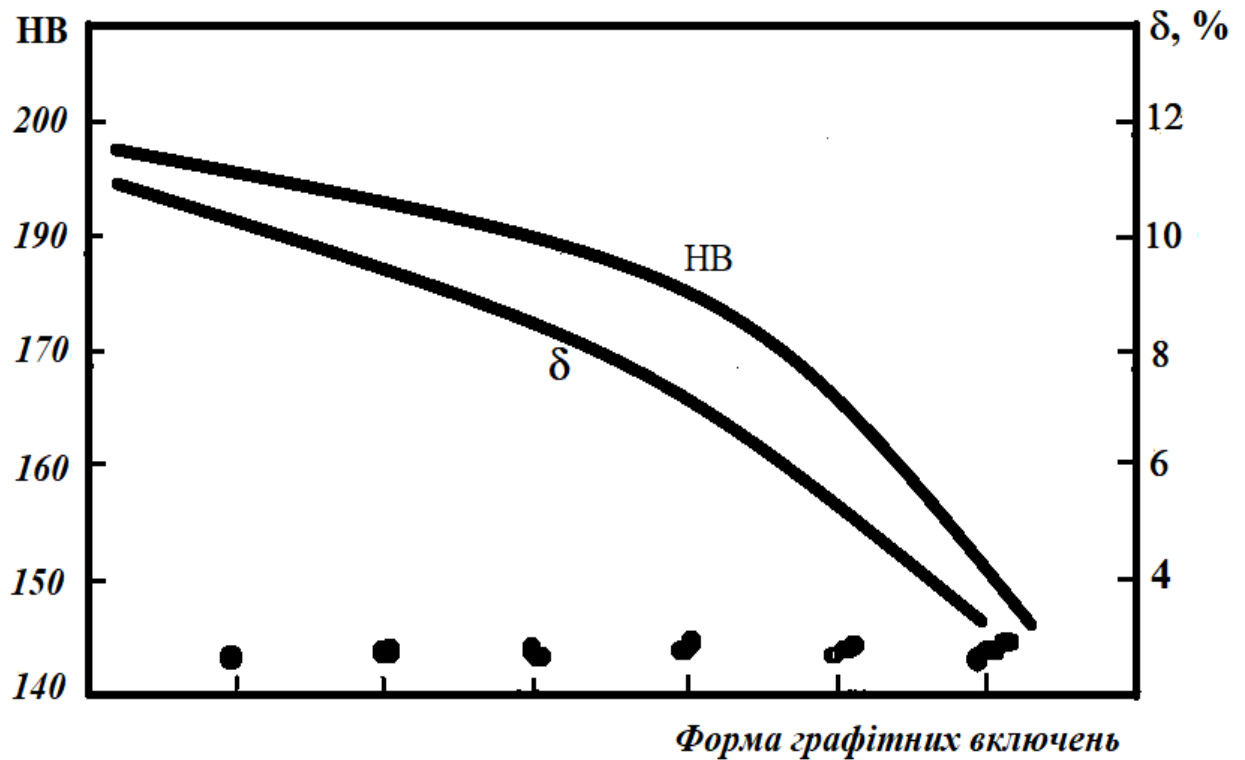


Рис. 1.1. Вплив форми графітових включень на твердість високоміцного чавуну

Аналізуючи рис. 1.1 маємо, що пластичність і твердість високоміцного чавуну буде знижуватися при наближенні форми графітних включень до пластинчастих. На механічні характеристики високоміцного чавуну має вплив також і зернистість механічної матриці, дані приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2

## Вплив величини зерна на твердість та міцність

Середній діаметр зерна фериту, мм	$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	НВ	Середній діаметр зерна, мм	$\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup>	НВ
10,3	18,9	118	0,3	27,8	143
7,8	35,8	132	0,16	29,0	176
2,7	40,3	139	0,12	40,4	200

### 1.3. Розгляд впливу між різними показниками механічних властивостей високоміцного чавуну

В літературних джерелах в залежності від виду високоміцного чавуну зустрічаються рівняння регресії між міцністю, твердістю, а також пластичністю. Дані залежності наведені в табл. 1.3. [11-14].

Таблиця 1.3

Залежності величин між міцністю, твердістю та пластичністю високоміцного чавуну

Вид чавуну	Залежність
Феритний високоміцний чавун	$\sigma_B=15+0,21НВ$ $\delta \%=0,35+0,22НВ$
Чавун з кулястим графітом	$\sigma_B=73,2-0,065НВ$ $\delta \%=7,35-0,019НВ$

Залежності такого виду звісно будуть специфічні для відповідних умов виробництва та використання у визначених областях при зміні показників механічних властивостей високоміцного чавуну (табл. 1.3).

## РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Об'єкт і предмет дослідження

*Об'єктом* проведення дослідження є феритний високоміцний чавун з наступним хімічним складом згідно ДСТУ 3925-99: C = 3,3–3,8 %; Si = 1,9–2,6 %; Mn = 0,20–0,60 %; S = до 0,02 %; P = до 0,10%; [15], який застосовують в багатьох галузях промисловості.. *Предметом дослідження* є вивчення впливу структури на твердість феритного високоміцного чавуну.

Основним процесом одержання високоміцного чавуну є наступні етапи: це плавка чавуну, його модифікування потім заливання у форму рідкого чавуну, далі чавун охолоджується та затвердіває.

Важливим етапом виготовлення високоміцного чавуну звісно буде модифікування, проведення модифікування буде впливати, на структуру графіту, в тому числі і на визначення механічних властивостей виливків.

### 2.2. Методика і матеріал дослідження

В процесі дослідження феритного високоміцного чавуну на твердість відливалися стандартні зразки згідно з ДСТУ 3925-99. Випробування та дослідження зразків на твердість виконували згідно ДСТУ 3925-99 у випробувальній лабораторії на твердість високоміцного чавуну [15].

### 2.3. Методика визначення залежностей впливу структури високоміцного чавуну на його твердість

В залежності від структури феритного високоміцного чавуну вивчаємо властивості, які звісно впливають на якість виробів із чавуну. Наразі треба розробляти і вдосконалювати методики та методи, які використовують для ефективних виробничих процесів виготовлення високоміцного чавуну.

Для проведення та оцінки дослідження впливу структури високоміцного чавуну на твердість застосовують методи теорії кореляції та регресійного аналізу [15-20].

Залежності твердості високоміцного чавуну від його структури визначали при використанні апроксимуючих функцій [15, 16, 20]:

$$\text{– лінійної} \quad y = b_1x + b_0 \quad (2.1)$$

$$\text{– поліноміальної другого ступеня} \quad y = b_2x^2 + b_1x + b_0 \quad (2.2)$$

Регресійні моделі знаходимо при використанні методів кореляційного аналізу, тобто виявляють кореляційний зв'язок між параметрами. Регресійний аналіз розглядають, як вплив структури на твердість феритного високоміцного чавуну, який полягає у встановленні зв'язку між незалежними змінними  $X_i$ , при цьому значення їх будуть змінюватися від залежної змінної  $Y_i$  та у визначенні параметрів математичних регресій, далі перевірка моделі на її адекватність [16-19].

Рівняння регресії запишемо у такому виразі:

$$y = b_1x + b_0. \quad (2.3)$$

Для розв'язку рівнянні (2.3) знаходимо коефіцієнти  $b_0$ ,  $b_1$ , які є невідомими.

Потім рівняння регресії наведемо в такому виразі

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x)^2 \rightarrow \min. \quad (2.4)$$

Система рівнянь для визначення коефіцієнтів регресії  $b_0$ ,  $b_1$

$$\begin{cases} nb_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n b_0 x_i + \sum_{i=1}^n b_i x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i. \end{cases} \quad (2.5)$$

Розрахунок коефіцієнтів  $b_0$ ,  $b_1$ , знаходимо за такими рівняннями

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}; \quad (2.6)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (2.7)$$

Залежність між вхідними і вихідними параметрами можна задавати у вигляді поліноміального рівняння регресії другого ступеня [16-19]:

$$y = b_2 x^2 + b_1 x + b_0. \quad (2.8)$$

Коефіцієнти приведенного вище рівняння регресії (2.8) визначаємо за наступним виразом:

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2)^2 \rightarrow \min. \quad (2.9)$$

Система рівнянь для визначення коефіцієнтів регресії  $b_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^2. \end{cases} \quad (2.10)$$

Знаходимо коефіцієнти регресії  $b_0, b_1, b_2$  з системи рівнянь, при використанні методу єдиного ділення Гауса, а вже потім визначаємо коефіцієнти апроксимуючої функції.

За допомогою коефіцієнта кореляційного відношення Пірсона, знаходимо тісноту зв'язку між параметрами  $x$  і  $y$  [16-20].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.11)$$

де  $n$  – кількість спостережень у проведеній вибірці;  $i = 1, 2, \dots, 100$  – номер спостереження;  $x_i$  – вміст елементу у високоміцному чавуні в  $i$ -ому спостереженні;  $\bar{x}, \bar{y}$  – математичне очікування звісно параметрів  $x, y$ ;

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (2.12)$$

$y_i$  – значення твердості високоміцного чавуну;

$$r = b \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}, \quad (2.13)$$

$b$  – коефіцієнт регресії при параметрі  $x$ ;

$\sigma_x^2$  – дисперсія параметра  $x$ :

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (2.14)$$

$\sigma_y^2$  – дисперсія параметра  $y$ :

Кореляційне відношення нелінійних залежностей

$$\eta = \frac{\sigma^2(y_{\text{per}})}{\sigma^2(y)}, \quad (2.15)$$

де  $\sigma^2(y_{\text{per}})$  – дисперсія параметра  $y_{\text{per}}$ ;

$\sigma^2(y)$  – дисперсія параметра  $y$ ;

$$\sigma^2(y_{\text{per}}) = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{per}})^2 \right] - \bar{y}^2; \quad (2.16)$$

$$\sigma^2(y) = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] - \bar{y}^2. \quad (2.17)$$

Статистичну значущість коефіцієнтів парної кореляції розраховуємо за статистичними методиками [16, 17].

Лінійна кореляційна залежність звісно між величинами  $x$  і  $y$  перевіряється за визначеним коефіцієнтом кореляції [16-20]

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i y_i - \bar{x} \bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (2.18)$$

де  $n$  – кількість виборок;  $\bar{x}, \bar{y}$  – середні значення величин  $x, y$ ;  $\sigma_x, \sigma_y$  – середньоквадратичні відхилення [16-21]

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (2.19)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (2.20)$$

При коефіцієнті кореляції коли  $r = 1$  є наявність лінійного функціонального зв'язку величин  $x$  і  $y$ , а коли  $r > 0,5$ , буде вже помітний лінійний зв'язок між цими величинами  $x$  і  $y$ .

Для оцінювання величин  $b_1, b_0$  у рівнянні (2.4) можна застосувати метод найменших квадратів [16-21].

Перевірку на значущість коефіцієнтів регресії можна виконати наступним чином:

– середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad (2.21)$$

– похибка коефіцієнта  $b_o$

$$\sigma_{b_o} = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}; \quad (2.22)$$

– похибка коефіцієнта  $b_l$ .

$$\sigma_{b_l} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (2.23)$$

За  $t$ -критерієм Стюдента можна визначити значущість коефіцієнтів регресії [16-21]

$$t_p = \frac{b_i}{\sigma_{b_i}}. \quad (2.24)$$

Визначене значення за  $t$ -критерієм Стюдента звісно порівнюють з табличним значенням критерію. Значення  $t$ -критерію Стюдента за таблицями знаходять для чисел ступенів вільності  $f = N - 1$  та звісно рівня значимості  $\alpha = 0,05$ . Отже, коефіцієнти  $b_i$  будуть звісно статистично значущі при  $t_p \geq t_{\text{табл.}}$ , а при  $t_p \leq t_{\text{табл.}}$  статистично не значущі.

Адекватність рівняння регресії знаходимо за критерієм Фішера [16-21]

$$F_p = \frac{(n-2) \left( \sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x - b_o)^2}. \quad (2.25)$$

Критерій Фішера  $F_p$  – буде вказувати на розподіл Фішера при ступенях вільності  $f_1 = n - 1$ ,  $f_2 = n - k$  та при рівні значущості  $\alpha = 0,05$ , за таблицями для розподілу Фішера звісно визначаємо  $F_{\text{табл}}$ . Якщо  $F_p \geq F_{\text{табл}}$  маємо неадекватне рівняння регресії, а от вже коли  $F_p \leq F_{\text{табл}}$ , то рівняння регресії є звісно адекватним.

## РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО ТВЕРДІСТЬ

### 3.1. Ефект впливу структури високоміцного чавуну на твердість (метод кореляції для залежності твердості високоміцного чавуну від структури)

При дослідженні впливу структури феритного високоміцного чавуну на його твердість будуюмо кореляційні таблиці (табл. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4) парних залежностей:  $HB = f(N_{тр})$ ;  $HB = f(D_{гр})$ ;  $HB = f(П\%)$  та  $HB = f(\Phi)$ . В ці таблиці вносимо показники механічних властивостей зразків, які задовольняють вимогам ДСТУ3925-99.

По даним кореляційних таблиць (табл. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4) знаходили емпіричні та теоретичні лінії регресії парних залежностей  $HB = f(N_{тр})$ ;  $HB = f(D_{гр})$ ;  $HB = f(П\%)$  і  $HB = f(\Phi)$ , та знаходили коефіцієнти кореляції звісно парних залежностей [16-21].

Рівняння теоретичної лінії регресії знаходимо з виразу:

$$y = c_y + i_y \cdot a' - b' \frac{i_y}{i_x} c_x + b' \frac{i_y}{i_x} x,$$

де  $c_y$  – середнє значення факторної ознаки при нульовому інтервалі;

$i_y$  – ширина інтервалу через результативну ознаку;

$i_x$  – ширина інтервалу через факторну ознаку;

$a'$  і  $b'$  – коефіцієнти, вони визначаються з системи рівнянь:

$$\begin{cases} n \cdot a' + (\sum m_x x') b' = \sum m_{xy} y' \\ (\sum m_x x') a' + (\sum m_x \cdot x^{12}) b' = x' \sum m_{xy} y', \end{cases}$$

де – всі величини приймаємо із кореляційних таблиць.

Коефіцієнт парної кореляції  $r$  визначаємо з рівняння:

$$r = \frac{nx' \sum m_{xy} y' - \sum m_x x' \sum m_y y'}{\sqrt{nm_x x'^2 - (m_x x')^2} \cdot \sqrt{nm_y y'^2 - (m_y y')^2}},$$

де всі величини приймаємо з кореляційних таблиць.

Наприклад, для криволінійних залежностей складали звісно розширені кореляційні таблиці (табл. 3.9, 3.10).

Теоретичне рівняння регресії у вигляді квадратичної функції  $y = a + bx + cx^2$  знаходили з рівняння:

$$\bar{y}_x = c_y + a' i_y + b' \frac{i_y}{i_x} - b' \frac{i_y}{i_x} c_x + \frac{i_y c' x^2}{i_x^2} - 2c' c_x \frac{i_y}{i_x^2} x + c' \frac{i_y}{i_x} c_x^2,$$

де  $C_y$  – середнє значення при результативній ознаці в нульовому інтервалі;

$C_x$  – середнє значення факторної ознаки при нульовому діапазоні;

$i_y$  – ширина інтервалу через результативну ознаку;

$i_x$  – ширина інтервалу через факторну ознаку;

$a'$ ,  $b'$  і  $c'$  – ці коефіцієнти, знаходили з наведеної системи рівнянь:

$$\begin{cases} \sum m_{xy} y' = n \cdot a' + \sum m_x x' b' + \sum m_x x'^2 c' \\ \sum x' m_{xy} y' = \sum m_x x' a' + \sum m_x x'^2 b' + \sum m_x x'^3 c' \\ \sum x'^2 m_{xy} y' = \sum m_x x'^2 a' + \sum m_x x'^3 b' + \sum m_x x'^4 c', \end{cases}$$

де величини приймаємо з кореляційних таблиць.

Знаходили тісноту зв'язку у випадку параболічної залежності при допомозі теоретичного кореляційного відношення

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\delta_{iT}^2}{\sigma^2}},$$

де  $\sigma'^2$  – загальна дисперсія, визначена за виразом:

$$\sigma'^2 = \frac{m_y y'^2}{n} - \left( \frac{m_y \dot{y}'}{n} \right),$$

$\bar{\delta}'^2_{iT}$  – показник, визначений за виразом:

$$\bar{\delta}'^2_{iT} = \frac{\sum (\bar{y}'_x - \bar{y}')^2 m_x}{n}.$$

### 3.1.1. Ефект впливу кількості виділень графіту ( $N_{гр}$ ) на твердість високоміцного чавуну

При вивченні впливу кількості виділень графіту на твердість феритного високоміцного чавуну формуємо кореляційну таблицю (табл. 3.1) та визначаємо емпіричну лінію регресії (табл. 3.1).

При визначенні рівняння теоретичної лінії регресії знаходимо коефіцієнти:  $a' = 1,2857$  та  $b' = 0,1826$ .

Рівняння теоретичної регресії має наступний вид:  $HB = 160,57 - 0,140N_{гр}$ .

Емпіричне та теоретичне рівняння регресії залежності  $HB = f(N_{гр})$  приведені на рис. 4.1.

Для встановлення тісноти зв'язку був розрахований коефіцієнт кореляції

$$r = 0,2574.$$

Перевірка гіпотези наявності кореляції між твердістю і кількістю виділень графіту здійснювали при допомозі  $t$ -критерію Стьюдента, який розраховується з наступного виразу:

$$t_{\text{роз}} = \frac{r}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} = \frac{0,2574}{\sqrt{1-0,2574^2}} \sqrt{324-2} = 4,78.$$

Табличне значення  $t$ -критерію Стюдента при цьому становить  $t_{\text{табл}} = 1,96$ .

При  $t_{\text{табл}} < t_{\text{роз}}$ , гіпотеза про кореляції між твердістю та числом графітних включень звісно підтверджується [16-21].

За  $t$ -критерієм Фішера вираз (2.25) знаходимо адекватність рівняння регресії, при  $F_p = 1,43 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , звідси рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.1

## Кореляція між твердістю і кількістю виділень графіту

$y'$	$x'$	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	Всього		
	НВ $N_{гр}$	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	$m_y$	$m_y y'$	$m_y \cdot y^2$
-1	131 – 141		-1 1							1	-1	1
0	141 – 158		7	33	23	24	14	16	14	131	0	0
1	158 – 165	1	8	17	27	14	7	9	2	85	85	85
2	165 – 172	3 1	7 4	11 4	11 5	12 6	7 2	7 4		29	58	116
3	172 – 189		26 8	44 15	17 5	20 6	26 8	8 3	3	48	144	432
4	189 – 196		34 9	14 3	10 2	22 6				20	80	320
5	196 – 202	8 2	17 3	15 3		15 3				11	55	275
$m_x$		4	40	75	62	59	31	32	21	324	422	1228
$\sum m_{xy} y'$		12	91	101	65	83	40	24	5	422		
$\bar{y}'_x = \frac{\sum m_{xy} y'}{m_x}$		3,00	2,27	1,346	1,048	1,406	1,29	1,33	0,238	11,928		

$\bar{y}_x = y_0 + \bar{y}'_x i_y$	153,19	150,39	142,97	141,46	143,46	142,83	139,54	136,67	1150,51		
$m_x x'$	-12	-80	-75	0	-59	62	96	84	16		
$m_x x'^2$	36	160	75	0	59	124	288	336	1078		
$x' \sum m_{xy} y'$	-36	-182	-101	0	83	80	72	25	-59		

### 3.1.2. Ефект впливу діаметра виділень графіту на твердість високоміцного чавуну

Для аналізу впливу кількості виділень графіту звісно на твердість феритного високоміцного чавуну створюємо кореляційну таблицю (табл. 3.2) та знаходження емпіричної лінії регресії.

Для розрахунку теоретичного рівняння регресії знаходимо коефіцієнти:

$$a' = 1,2514; b' = 1,2834$$

Рівняння регресії має такий вигляд:

$$HB = 149,15 + 0,085D_{гр}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1298.$$

За допомогою  $t$ -критерію Стюдента підтверджуються кореляції між твердістю та звісно діаметром виділень графіту [16-21].

Емпіричне і теоретичне рівняння регресії  $HD = f(D_{гр})$  наведено на рис. 4.2, при цьому видно, що емпірична лінія регресії буде мати форму, яка близька до параболічної.

Перевіряючи гіпотезу про параболічну залежність твердості феритного високоміцного чавуну від діаметра графітних включень, формуємо далі кореляційну таблицю (табл. 3.2).

Для отримання теоретичної регресії у вигляді параболи визначаємо такі коефіцієнти:  $a' = 1,3963$ ;  $b' = 0,1589$ ;  $c' = 0,0856$ .

Визначена теоретична лінія регресії, наведена на рис. 4.2, має такий вид:

$$HB = 128,87 + 0,078D_{гр} + 0,004D_{гр}^2.$$

Кореляційне відношення дорівнює: [16-21]

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\frac{31,581}{336}}{\frac{1282}{336} - \left(\frac{422}{336}\right)^2}} = 0,205.$$

Так як розраховане кореляційне відношення дійсно отримали більше за коефіцієнт кореляції, тому гіпотеза про криволінійну залежність твердості від розміру графітних включень звісно буде підтверджена.

Таблиця 3.2

## Кореляція між твердістю і діаметром графітних включень

$y'$	$x'$	-2	-1	0	1	2	3	4	Всього		
	HB / $D_{гр}$	30-40	40-60	60-70	70-90	90-110	110-120	120-130	$m_y$	$m_y y'$	$m_y \cdot y^2$
-1	134 – 141				-1 1		1		1	-1	1
0	141 – 158	37	18	42	13	23	0,1584		133		
1	158 – 165	9 9	10 10	37 37	13 13	16 16		3 3	88	88	88
2	165 – 172	9 4	14 7	9 5	17 8	7 4			28	56	112
3	172 – 189	13 5	25 8	76 25	25 8	19 6		7 3	55	165	495
4	189 – 196	14 3	14 4	24 7	10 3	22 5			21	84	336
5	196 – 202			35 7	15 3				10	50	250
$m_x$		58	47	125	49	54	1,1584	6	335	442	1282
$\sum m_{xy} y'$		45	63	181	79	64		10	442		

$\bar{y}'_x = \frac{\sum m_{xy}y'}{mx}$	0,775	1,340	1,448	1,612	1,185		1,66	7,984		
$\bar{y}_x = y_0 + \bar{y}'_x i_y$	128,97	134,73	135,57	136,15	133,57		139,5	940,64		
$m_x x'$	-116	-47	0	49	108		24	18		
$m_x x'^2$	232	47	0	49	216		96	607		
$m_{xy} y' x'$	-90	-63	0	79	128		40	94		
$m_x x'^3$	-464	-47	0	49	432		384	354		
$m_x x'^4$	928	47	0	49	864		1536	3424		
$m_{xy} y' x'^2$	360	63	0	79	256		160	918		
$\bar{y}'_x$	0,775	1,1628	1,3852	1,4586	1,3841	1,1584	0,7843	Визначаємо із співвідношення $\bar{y}'_x = \frac{y_x - y_0}{i_y - m_x}$		
$(\bar{y}'_x - \bar{y}')^2 m_x$	14,986	3,453	3,754	3,729	2,738	0	2,921	31,581		
$\bar{y}_x$	130,04	132,64	134,2	134,71	134,19	132,61	129,99	Визначаємо за теоретичною лінією регресії квадратичної параболи		

### 3.1.3 Ефект впливу вмісту перліту на твердість високоміцного чавуну

Для дослідження впливу кількості перліту на твердість феритного високоміцного чавуну формується кореляційна таблиця (табл. 3.3) та знаходиться емпірична лінія регресії.

Для отримання рівняння теоретичної лінії регресії розраховані коефіцієнти [16-21]

$$a' = 1,1020; b' = 0,3855.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії  $HB = 148,18 + 0,97\P%$ .

Емпірична та теоретична лінії регресії (це залежність  $HD = f(\Pi\%)$ ) приведені на рис. 4.3.

Для встановлення тісноти зв'язку розраховали коефіцієнт кореляції:

$$r = 0,3173.$$

Перевіряючи кореляції за допомогою  $t$ -критерію Стьюдента можна стверджувати про наявність кореляції зв'язно між твердістю та вмістом перліту [16-21]

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,3173}{\sqrt{1 - 0,3173^2}} \cdot \sqrt{316 - 2} = 5,93 > t_{\text{табл}} = 1,96.$$

За  $t$ -критерієм Фішера за формулою (2.25) розраховуємо адекватність рівняння регресії зв'язно, якщо  $F_p = 1,83 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , маємо адекватне рівняння регресії.

Таблиця 3.3

## Кореляція між твердістю та кількістю перліту (П%)

$y'$	$x'$	-1	0	1	2	3	Всього		
	НВ П%	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	$m_y$	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
0	141 – 158	41	39	27	7	7	121	0	0
1	158 – 165	6	38	17	11	3	75	75	75
2	165 – 172	8	22	34	6		35	70	140
3	172 – 189	14	67	43	22	13	53	159	477
4	189 – 196		24	28	8	20	20	80	320
5	196 – 202		15	18	10	17	12	60	300
$m_x$		53	120	86	33	24	316	444	1312
$m_{xy} y'$		28	166	140	57	53	444		
$\bar{y}'_x$		0,528	1,383	1,627	1,727	2,208	7,473		
$\bar{y}_x$		125,95	132,67	134,35	134,42	138,97	666,4		
$m_x x'$		-53	0	86	53	72	158		
$m_x x'^2$		53	0	86	132	216	487		
$x' \sum m_{xy} y'$		-28	0	140	114	159	385		

### 3.1.4. Ефект впливу середнього діаметра зерна фериту на твердість високоміцного чавуну

Вивчаючи вплив розміру феритного зерна на твердість високоміцного чавуну, була створена кореляційна таблиця (табл. 3.4) та звісно знайдена емпірична лінія регресії [16-21].

Щоб визначити емпіричну лінію регресії, треба знайти коефіцієнти

$$a' = 1,182; b' = -0,07738.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії  $HV = 156,37 - 0,095\Phi$ .

Коефіцієнт кореляції дорівнює

$$r = -0,09295.$$

Наявність кореляції між твердістю та розміром феритного зерна перевіряємо за допомогою  $t$ -критерію Стьюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,09295}{\sqrt{1 - 0,09295^2}} \cdot \sqrt{351 - 2} = 18,69.$$

При  $t_{\text{роз}} > t_{\text{табл}} = 1,96$ , лінійна кореляція звісно між досліджуваними факторами існує.

Перевірка на наявність кореляції між твердістю і розміром феритного зерна виконується і у вигляді лінійної та параболічної залежності [16-21].

Для цього розраховали коефіцієнти:  $a' = 1,253$ ;  $b' = -0,063$ ;  $c' = -0,025$  та знайшли рівняння теоретичної лінії регресії.

$$HV = 134,53 + 0,702\Phi - 0,008\Phi^2.$$

Теоретична лінія регресії приведена на рис. 4.4.

Кореляційне відношення дорівнює

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\frac{8,299}{351}}{\frac{1326}{351} - \left(\frac{458}{351}\right)^2}} = 0,105.$$

Так як кореляційне відношення має більше значення за коефіцієнт кореляції, тому гіпотеза про наявність кореляції звісно у вигляді параболічної залежності між твердістю та розміром феритного зерна все-таки більш достовірна, ніж гіпотеза про прямолінійну залежність.

Таблиця 3.4

Кореляція між твердістю і середнім діаметром зерна фериту в мкм

$y'$	$x'$	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	Всього		
	НВ $\Phi$	25-30	30-35	35-40	40-45	45-50	50-55	55-60	60-65	$m_y$	$m_y y'$	$m_y \cdot y^2$
-1	134 – 141			-1 1						1	-1	1
0	141 – 158	9	4	1	61	2	16	2	8	103	0	0
1	158 – 165	11 11	32 32	6 6	34 34		8 8	1 1	3 3	95	95	95
2	165 – 172	13 6	9 5	4 2	17 8		7 3	3 2	5 3	29	58	116
3	172 – 189	15 5	38 13	11 3	80 27		21 7			55	165	495
4	189 – 196	8 2	28 7		36 9	8 2				20	80	320
5	196 – 202		28 4	10 2	14 4		8 2			12	60	300
$m_x$		33	65	15	143	4	36	5	14	315	458	1326
$m_{xy} y'$		48	139	30	174	8	47	4	8	458		
$\bar{y}'_x$		1,454	2,138	2,0	1,216	2	1,305	0,80	0,571	11,484		
$\bar{y}_x$		132,39	132,25	134,28	132,04	137,5	131,13	128,75	127,28	1055,9		

$m_x x'$	-99	-130	-15	0	4	72	15	56	-97		
$m_x x'^2$	297	260	15	0	4	144	45	224	989		
$m_{xy} y' x'$	-144	-278	-30	0	8	94	12	32	-306		
$m_{xy} y' x'^2$	432	556	30	0	8	188	36	128	1378		
$m_x x'^3$	-891	-520	-15	0	4	288	135	896	-103		
$m_x x'^4$	3003	1040	12	0	4	576	405	3548	8588		
$\bar{y}'_x$	2,218	0,279	2,291	0,253	2,165	0,0275	2,839	0,601	10,735		
$(\bar{y}'_x - \bar{y}')^2 m_x$	0,0861	0,55	1,083	0,3297	0,003	1,0642	1,533	4,7294	8,299		

### 3.1.5. Отримання рівняння множинної кореляції твердості від структури високоміцного чавуну

При отриманні загальної картини впливу структури на твердість феритного високоміцного чавуну, отримано рівняння множинної кореляції.

Вираз множинної кореляції має наступний вигляд: [16-21]

$$\bar{t}_1 = \beta_2 t_2 + \beta_3 t_3 + \dots + \beta_k t_k,$$

де  $\bar{t}_1$  – значення результативної ознаки звісно при значеннях факторних ознак;

$t_2, \dots, t_k$  – значення факторних ознак;

$\beta_i$  – коефіцієнт множинного зв'язку.

Множинний коефіцієнт кореляції визначаємо за виразом:

$$R = \sqrt{r_{12}\beta_2 + r_{13}\beta_3 + \dots + r_{1k}\beta_{1k}}.$$

Коефіцієнти множинного зв'язку  $\beta_i$  визначаються з наступної системи рівнянь:

$$\begin{cases} r_{12} = \beta_2 + \beta_3 r_{32} + \beta_4 r_{42} + \beta_k r_{k2} \\ r_{13} = \beta_2 r_{23} + \beta_3 + \beta_4 r_{43} + \dots + \beta_k r_{k3} \\ \dots \\ r_{1k} = \beta_2 r_{2k} + \beta_3 r_{3k} + \beta_4 r_{4k} + \dots + \beta_k. \end{cases}$$

Коефіцієнти рівняння множинної кореляції при вираженні у натуральному масштабі, визначаються за формулою:

$$b_i = \frac{\sigma_1}{\sigma_i} \beta_i,$$

$$a: a = \bar{x}_{1,2,3,\dots,k} - \sum b_i \bar{x}_i,$$

де  $a$  – це вільний член виразу множинної кореляції;

$\bar{x}_{1,2,3,\dots,k}$  – середнє арифметичне значення звісно результативної озна-

ки;

$\bar{x}_i$  – середнє значення факторних ознак.

Щоб отримати рівняння множинної кореляції побудували кореляційні табл. 3.5-3.10 звісно для підтвердження гіпотези, що є кореляційний зв'язок між факторними ознаками.

Наприклад, для визначення кореляції між числом та діаметром графітних включень побудували кореляційну табл. 3.5 і знайшли емпіричну лінію регресії (рис. 4.5).

Для знаходження рівняння регресії треба знайти коефіцієнти

$$a' = 1,4436; b' = -0,3897.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$N_{\text{гр}} = 67,35 - 0,263D_{\text{гр}}.$$

Коефіцієнт кореляції становить:

$$r = 0,3124.$$

Розрахунковий  $t$ -критерій Стьюдента дорівнює

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,3124}{\sqrt{1 - 0,3124^2}} \cdot \sqrt{450 - 2} = 6,95.$$

При  $t_{\text{роз}} > t_{\text{табл}} = 1,96$ , звісно між діаметром і числом графітних включень є кореляція [16-20].

За  $t$ -критерієм Фішера, це рівняння (2.25) визначили адекватність рівняння регресії, маємо, що  $F_{\text{р}} = 0,74 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.5

## Кореляція між діаметром і числом графітних включень

$y'$	$x'$	-2	-1	0	1	2	3	Всього		
	$N_{гр} \backslash D_{гр}$	30-40	40-60	60-70	70-90	90-100	120-130	$m_y$	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
-2	10-20		-2 2		-6 3	-4 2		7	-12	28
-1	20-30	-5 5	-4 4	-19 19	-4 4	-17 17	4 4	53	-53	53
0	30-40	10	11	29	18	22		90	0	0
1	40-50	11 11	12 12	32 32	12 12	17 17		84	84	84
2	50-60	41 21	35 18	49 24	15 6	20 10	6 4	83	166	316
3	60-70	36 13	24 9	72 25	23 5	15 5		57	172	513
4	70-80	52 13	36 9	72 18	20 5	20 5		50	200	800
5	80-90	50 10	25 5	30 6	10 2	15 3		26	130	650
$m_x$		83	70	153	55	81	8	450	687	2444
$m_{xy} y'$		185	126	236	70	60	10	687		
$\bar{y}'_x$		2,228	1,80	1,542	1,272	0,740	1,25	8,83		

$\bar{y}_x$	55,9	53,6	48,9	43,6	42,5	36	280,5		
$m_x x'$	-166	-70	0	55	151	21	-9		
$m_x x'^2$	332	70	0	55	299	79	835		
$m_{xy} y' x'$	-370	-126	0	70	120	30	-276		

При знаходженні кореляційної залежності між кількістю включень графіту та вмістом перліту побудували кореляційну табл. 3.6 і визначили емпіричну лінію регресії (рис. 4.6).

При визначенні теоретичної лінії регресії знаходимо коефіцієнти:

$$a' = 0,7903; b' = -0,1986.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії:

$$П\% = 8,78 - 0,040N_{гр}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює

$$r = -0,1998.$$

Перевірка кореляції між кількістю перліту і числом графітних включень при допомозі  $t$ -критерію Стьюдента [16-20].

$$t_{роз} = \frac{0,1998}{\sqrt{1 - 0,1998^2}} \cdot \sqrt{442 - 2} = 4,28.$$

Гіпотеза про наявність кореляції між вмістом перліту і числом графітних включень підтверджується, так як  $t_{роз} > t_{табл} = 1,96$ .

За  $t$ -критерієм Фішера з (2.25) встановлюємо адекватність рівняння регресії, рівняння регресії адекватне, якщо  $F_p = 0,86 \leq F_{табл} = 2,0$ .

Щоб підтвердити гіпотезу про наявність кореляційного зв'язку між кількістю включень графіту та розміром феритного зерна звісно треба побудувати кореляційну табл. 3.7 та визначити емпіричну лінію регресії.

Таблиця 3.6

## Кореляція між вмістом перліту і кількістю включень графіту

$y'$	$x'$	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	Всього		
	П% \ $N_{гр}$	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	$m_y$	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
-2	0-2		-4 2	-6 3	-14 7	-14 7	-10 5	-4 2	-4 2	-4 2	30	-60	120
-1	2-4		-8 8	-27 27	-22 22	-17 17	-14 14	-14 14	-7 7	-3 3	112	-112	112
0	4-6	2	18	28	20	23	3	12	4	2	112	0	0
1	6-8		7 7	14 14	17 17	21 21	12 12	2 2	2 2		75	75	75
2	8-10		14 7	14 7	16 8	6 3	8 4	4 2			31	66	124
3	10-12	9 3	12 4	16 12	16 7	15 5		21 7			39	121	342
4	12-14		8 2	8 2	24 6	8 2		8 2			14	60	224
5	14-16	15 3	25 5	30 6	20 4	15 3	10 2	10 2			25	125	625

$m_x$	8	53	105	91	81	40	38	15	7	438	275	1622	
$m_{xy}y'$	24	50	99	53	32	6	23	-5	-7	275			
$\bar{y}'_x$	3,0	0,94	0,942	0,57	0,39	0,15	0,60	-0,33	-1,00	5,26			
$\bar{y}_x$	11,34	7,62	5,14	7,1	6,52	5,95	6,64	5	3,6	58,87			
$m_x x'$	-16	-53	0	91	162	120	152	75	42	573			
$m_x x'^2$	32	53	0	91	405	360	608	375	84	2008			
$m_{xy}y'x'$	-48	-50	0	53	64	18	92	-25	-49	-55			

Таблиця 3.7

## Кореляція між розміром зерна фериту і числом включень графіту

$y'$	$x'$	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	Всього		
	$N_{\text{ГР}}$ $\Phi(\text{МКМ})$	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	$m_y$	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
-3	25-30		-2 1	-25 8	-29 9	-8 3	-14 5	-6 2			28	-84	252
-2	30-35	-4 2	-23 11	-70 35	-29 15	-65 32	-22 11	-20 10	-23 12		128	-256	520
-1	35-40			-3 3	-4 4	-5 5		-3 3			15	-15	15
0	40-45	3	18	33	34	23	25	20	3	4	163	163	163
1	45-50		2 2	3 3	3 3						8	8	8
2	50-55		8 4	20 10	18 9	30 15	6 3	14 7	8 4	6 3	55	110	220
3	60-65		12 4	9 3	24 7	8 3	5 2	8 3			22	66	196
$m_x$		5	40	95	81	81	46	45	19	7	419	-8	1374
$m_{xy} y'$		-4	-3	-66	16	40	25	-7	-15	6	-8		
$\bar{y}'_x$		-0,80	-0,075	-0,694	0,197	0,493	0,543	-0,155	-0,789	0,85	-0,43		

$\bar{y}_x$	38,15	43,47	36,48	42,41	38,7	37,4	43,56	38,3	45,5	363,9		
$m_x x'$	-10	-40	0	81	162	75	180	95	42	585		
$m_x x'^2$	20	40	0	81	324	414	720	478	252	2329		
$m_{xy} y'x'$	8	-3	0	16	80	75	-28	-75	36	259		

Для отримання рівняння лінії регресії знаходимо коефіцієнти:

$$a' = -0,5752; b' = 0,02534.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\Phi = 40,42 + 0,0127N_{\text{гр.}}$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,02383.$$

Визначасмо кореляцію між числом включень графіту та розміром зерна фериту за  $t$ -критерієм Стьюдента

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,02383}{\sqrt{1 - 0,02383^2}} \cdot \sqrt{419 - 2} = 0,48.$$

Оскільки  $t_{\text{роз}} < t_{\text{табл}} = 1,96$ , між числом графітних включень та звісно розміром зерна фериту кореляція тут відсутня [16-21].

За  $t$ -критерієм Фішера за рівнянням (2.25) знайдемо адекватність рівняння регресії, воно адекватне, якщо  $F_{\text{р.}} = 0,93 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ .

На підтвердження гіпотези про кореляцію між вмістом перліту та розміром графітних включень сформована кореляційна табл. 3.8 і емпірична лінія регресії (рис. 4.7).

При визначенні теоретичної лінії регресії визначені коефіцієнти:

$$a' = -0,06859; b' = 0,2197.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії:

$$D_{\text{гр}} = 67,83 + 0,105\P\%.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1878.$$

За  $t$ -критерієм Стюдента виконаємо перевірку кореляції між розміром графітних включень і вмістом перліту:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1878}{\sqrt{1-0,1878^2}} \cdot \sqrt{427-2} = 3,94.$$

З рис. 4.8 випливає, що емпірична лінія регресії має близький вигляд більш звісно до параболічної залежності, аніж до прямолінійної.

Адекватність рівняння регресії за  $t$ -критерієм Фішера за формулою (2.25) отримаємо, якщо  $F_p = 1,37 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , звісно рівняння регресії адекватне.

Для перевірки гіпотези параболічної залежності розміру графітних включень від вмісту перліту формуємо розширену кореляційну табл. 3.8.

Таблиця 3.8

## Кореляція між розмірами графітних включень та вмістом перліту

$y'$	$x'$	-1	0	1	2	3	Всього		
	$\begin{matrix} \text{П\%} \\ D_{\text{Гр}} \end{matrix}$	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	$m_y$	$m_y y'$	$m_y \cdot y^2$
-2	30-40	$\begin{matrix} -70 \\ 35 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -52 \\ 26 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -18 \\ 9 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -6 \\ 3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -6 \\ 3 \end{matrix}$	76	-152	304
-1	40-60	$\begin{matrix} -14 \\ 14 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -24 \\ 24 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -13 \\ 13 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -3 \\ 3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -4 \\ 4 \end{matrix}$	58	-58	58
0	60-70	20	56	52	20	13	157	157	157
1	70-90	$\begin{matrix} 6 \\ 6 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 29 \\ 29 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 9 \\ 9 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 7 \\ 7 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 5 \\ 5 \end{matrix}$	56	56	56
2	90-100	$\begin{matrix} 24 \\ 12 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 60 \\ 30 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 34 \\ 17 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 12 \\ 6 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 12 \\ 6 \end{matrix}$	71	142	284
3	110-130	$\begin{matrix} 5 \\ 2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 9 \\ 3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 13 \\ 4 \end{matrix}$			9	27	81
$m_x$		89	166	102	39	31	427	172	940
$m_{xy} y'$		-89	123	121	10	7	172		
$\bar{y}'_x$		-1,0	0,740	1,186	0,25	0,225	1,401		
$\bar{y}_x$		57,59	68,94	71,077	72,04	71,05	340,69		
$m_x x'$		-89	0	102	78	93	184		

$m_x x'^2$	89	0	102	156	279	626		
$x'^2 m_{xy} y'$	-89	0	121	40	63	135		
$m_x x'^3$	-89	0	102	312	837	1162		
$m_x x'^4$	89	0	102	624	2511	3326		
$(\bar{y}'_x - \bar{y}')^2 m_x$	26,88	0,03881	31,9385	3,7576	2,7347	65,3496		

Для одержання теоретичної лінії регресії у вигляді параболи розраховуємо коефіцієнти: [16-21].

$$a' = 0,0315; b' = 0,4251; c' = -0,1413.$$

Теоретична лінія регресії, наведена на рис. 4.8, має вигляд:

$$D_{\text{гр}} = 61,95 + 5,14\P\% - 0,35(\P\%)^2.$$

Кореляційне відношення дорівнює:

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\frac{65,3496}{427}}{\frac{940}{427} - \left(\frac{172}{427}\right)^2}} = 0,273.$$

Маємо розраховане кореляційне відношення, воно більше коефіцієнта кореляції, тому гіпотеза про криволінійну залежність зв'язно розміру графітних включень від вмісту перліту буде підтверджена.

При вмісті перліту до 10% та з зростанням його кількості зв'язно розмір графітних включень буде збільшуватися, а от при вмісті перліту вже більше 10% збільшення його вмісту не призводить до суттєвої зміни розміру графітних включень, як видно з рис. 4.8.

Підтвердження гіпотези про кореляцію зв'язно між вмістом перліту та розміром феритного зерна виконуємо розглядом побудованої кореляційної табл. 3.9 і визначаємо емпіричну лінію регресії (рис. 4.9).

Для отримання зв'язно рівняння регресії знаходимо коефіцієнти:

$$a' = -0,3076; b' = 0,04313.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії:

$$\Phi = 48,7 + 0,15\P\%.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r=0,03871.$$

Підтвердимо кореляцію між кількістю перліту та розміром феритного зерна.

Розрахункове значення  $t$ -критерію Стьюдента становить: [16-21].

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,03871}{\sqrt{1 - 0,03871^2}} \cdot \sqrt{427 - 2} = 0,86; \quad t_{\text{табл}} = 1,96.$$

При  $t_{\text{табл}} > t_{\text{роз}}$ , то кореляція між вмістом перліту і розміром феритного зерна, як видно відсутня.

За  $t$ -критерієм Фішера (2.25) звісно визначається адекватність рівняння регресії, отже, якщо  $F_{\text{р.}} = 1,43 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , отримаємо позитивно, адекватне рівняння регресії.

Для верифікації гіпотези про наявність кореляції між розміром феритного зерна та звісно розміром графітних включень розрахована кореляційна табл. 3.10 і визначена емпірична лінія регресії (рис. 4.10).

Таблиця 3.9

## Кореляція між вмістом перліту та розміром зерна фериту

$y'$	$x'$	-1	0	1	2	3	Всього		
	$\Phi$ , мкм	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	$m_y$	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
-2	20-30	-4 5	-32 16	-18 9	-6 3		33	-66	132
-1	30-40	-35 35	-60 60	-31 31	-8 8	-12 12	146	-146	146
0	40-50	31	72	38	21	11	173	173	173
1	50-60	12 12	15 15	19 19	3 3	4 4	53	53	53
2	60-70	8 4	18 9	8 4	6 3	4 2	22	44	88
$m_x$		87	172	101	38	29	427	58	373
$m_{xy} y'$		-26	55	20	4	5	58		
$\bar{y}'_x$		-0,298	0,319	0,198	0,105	0,172	0,496		
$\bar{y}_x$		42,95	42,46	43,73	44,51	43,59	217,2		
$m_x x'$		-87	0	101	76	87	336		
$m_x x'^2$		87	0	101	152	261	601		
$x' m_{xy} y'$		26	0	20	8	15	69		

Таблиця 3.10

Кореляція між розмірами феритних зерен  
і розмірами графітних включень

$y'$	$x'$	-1	0	1	2	3	Всього		
	$\Phi$ , МКМ $D_{гр}$ , МКМ	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	$m_y$	$m_y y'$	$m_y y'^2$
-2	30-40	-12 6	-74 37	-52 26	-8 4	-4 2	75	-150	300
-1	40-60	-4 4	-30 30	-16 16	-12 12		62	-62	62
0	60-70	15	46	66	21	6	154	154	154
1	70-90	6 6	16 16	23 23	7 7	6 6	58	58	58
2	90-100	6 3	35 18	73 37	21 11	9 5	74	144	288
3	100-120		6 2				2	6	18
4	120-130		18 5	10 2			7	28	112
$m_x$		34	154	170	55	19	432	178	992
$m_{xy} y'$		-4	115	48	8	11	178		
$\bar{y}'_x$		-0,117	0,746	0,282	0,145	0,578	1,63		
$\bar{y}_x$		64,5	65,78	71,32	67,78	78,92	348		
$m_x x'$		-34	0	170	110	57	303		
$m_x x'^2$		34	0	170	220	171	435		
$m_{xy} y' x'$		-4	0	48	16	33	93		

При розгляді рівняння теоретичної лінії регресії знаходимо необхідні коефіцієнти:

$$a' = -0,3176; b' = 0,04312.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$D_{\text{гр}} = 37,35 + 0,47\Phi.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r=0,1538.$$

Розрахунковий  $t$ -критерій Стьюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1538}{\sqrt{1 - 0,1538^2}} \cdot \sqrt{427 - 2} = 3,21.$$

Якщо  $t_{\text{табл}} > t_{\text{роз}} = 1,96$ , маємо кореляційний зв'язок між розміром зерна фериту та розміром графіту.

Критерій Фішера (2.25) дає можливість визначити адекватність рівняння регресії, тому, якщо  $F_{\text{р.}} = 1,53 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , відповідно рівняння регресії адекватне.

## РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Досліджуючи вплив структури на механічні властивості високоміцного чавуну, застосовували пакет програми MathCAD та інші [22, 23, 24, 25].

Коефіцієнти відшукуваних функцій рівнянь регресій або математичних моделей також доцільно розраховувати в середовищі MathCAD.

Математичні розрахунки звісно для побудови графіків залежностей  $y = f(x)$  доцільно виконувати в середовищі пакету MathCAD та графічних редакторів Microsoft Office.

Проведені дослідження залежності твердості високоміцного чавуну від структури, наведені на рис. 4.1–4.10.

### 4.1. Вплив кількості виділень графіту на твердість високоміцного чавуну

Залежність твердості високоміцного чавуну від кількості виділень графіту наведено на рис. 4.1. Емпірична та теоретична лінії регресії залежності  $HB = f(N_{гр})$  наведені на рис. 4.1.

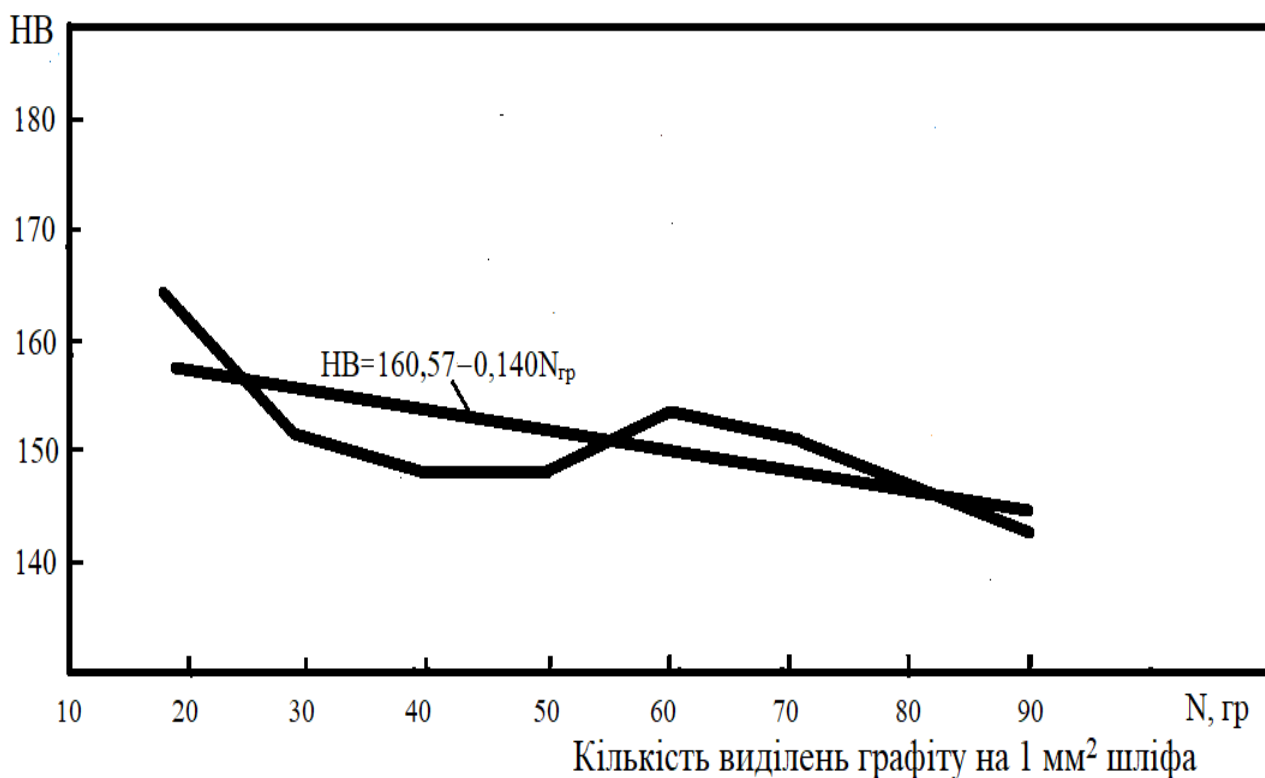


Рис. 4.1. Залежність твердості високоміцного чавуну від числа включень графіту на 1 мм<sup>2</sup> поверхні шліфа

Отже з рис. 4.1. маємо, що в межах досліджуваної вибірки твердість високоміцного чавуну буде знижуватися з збільшенням числа графітних включень на  $1 \text{ мм}^2$ , про це свідчить відповідне значення коефіцієнта кореляції  $r = 0,2574$ . Залежність між наведеними факторами звісно прямолінійна.

#### 4.2. Вплив діаметра графітних включень високоміцного чавуну на твердість $HB = f(D_{\text{гр}})$

Залежність твердості високоміцного чавуну від діаметра графітних включень показана на рис. 4.1. При перевірці коефіцієнта кореляції критерієм Стюдента виявлено, що відсутня кореляція між цими ознаками. Тому, діаметр графітних включень не буде надавати суттєвого впливу на твердість високоміцного чавуну.

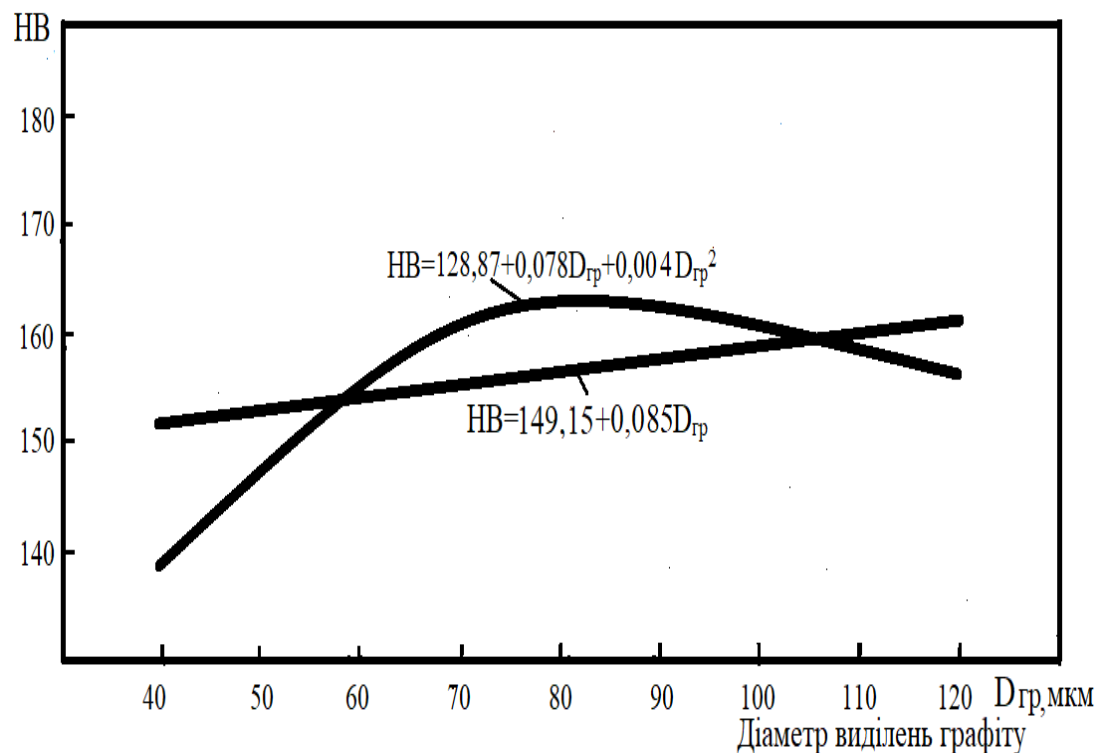


Рис. 4.2. Залежність діаметра виділень графіту від твердості високоміцного чавуну

З рис. 4.2 підтверджується, що при розмірі графітних включень звісно менше 85 мкм з збільшенням розмірів графітних включень все-таки збільшується твердість. А вже при збільшенні розміру графітних включень понад 85 мкм твердість починає звісно знижуватися. Пояснюється це тим, що при розмі-

рі графітних включень менше 85 мкм на твердість звісно переважний вплив буде чинити число графітних включень.

При збільшенні розміру графітних включень вже понад 85 мкм, вони будуть суттєво впливати звісно на твердість, при цьому збільшуючи пористість металевої матриці.

#### 4.3. Вплив вмісту перліту на твердість високоміцного чавуну $HB = f(P\%)$

Залежність твердості високоміцного чавуну від вмісту перліту приведено на рис. 4.3.

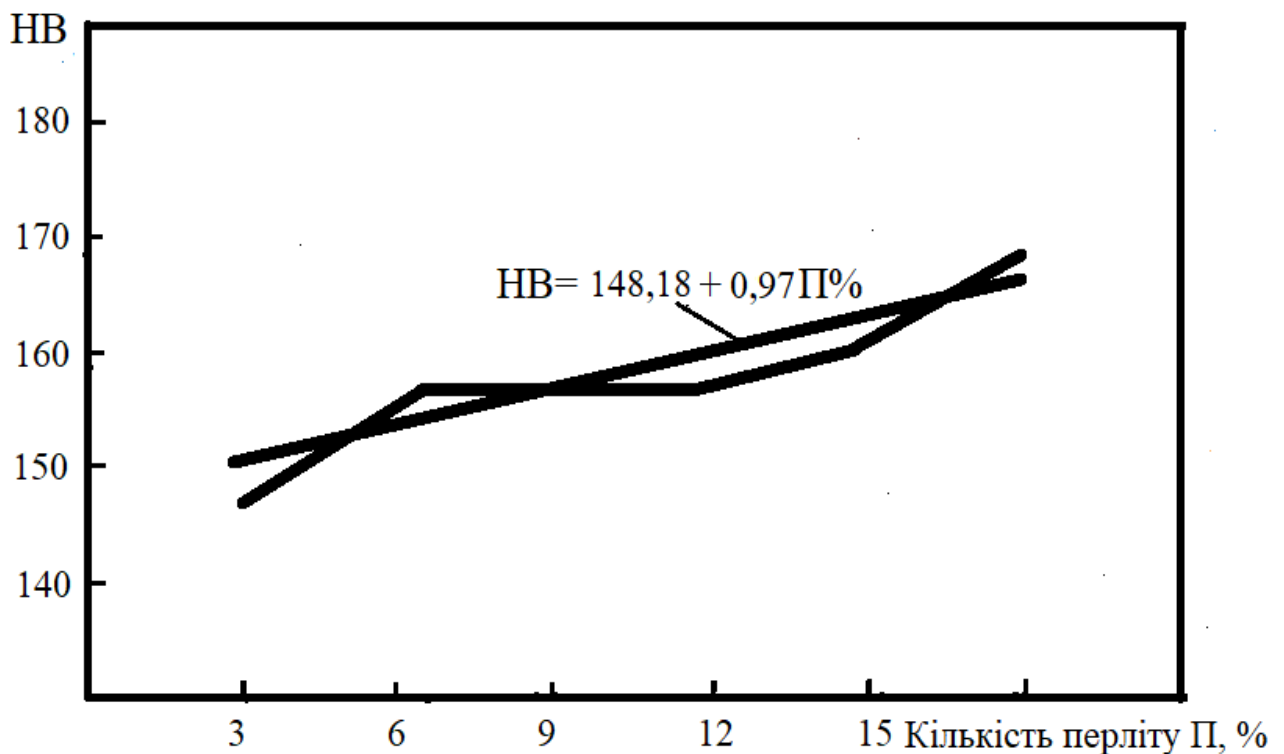


Рис. 4.3. Залежність вмісту перліту на твердість високоміцного чавуну

При варифікації даних з рис. 4.3 підтверджується, що в межах досліджуваної вибірки твердість високоміцного чавуну підвищується звісно з збільшенням вмісту перліту.

#### 4.4. Вплив розміру феритного зерна на твердість високоміцного чавуну

$$HB = f(\Phi).$$

Залежність твердості високоміцного чавуну від розміру феритного зерна звісно приведена на рис. 4.4.

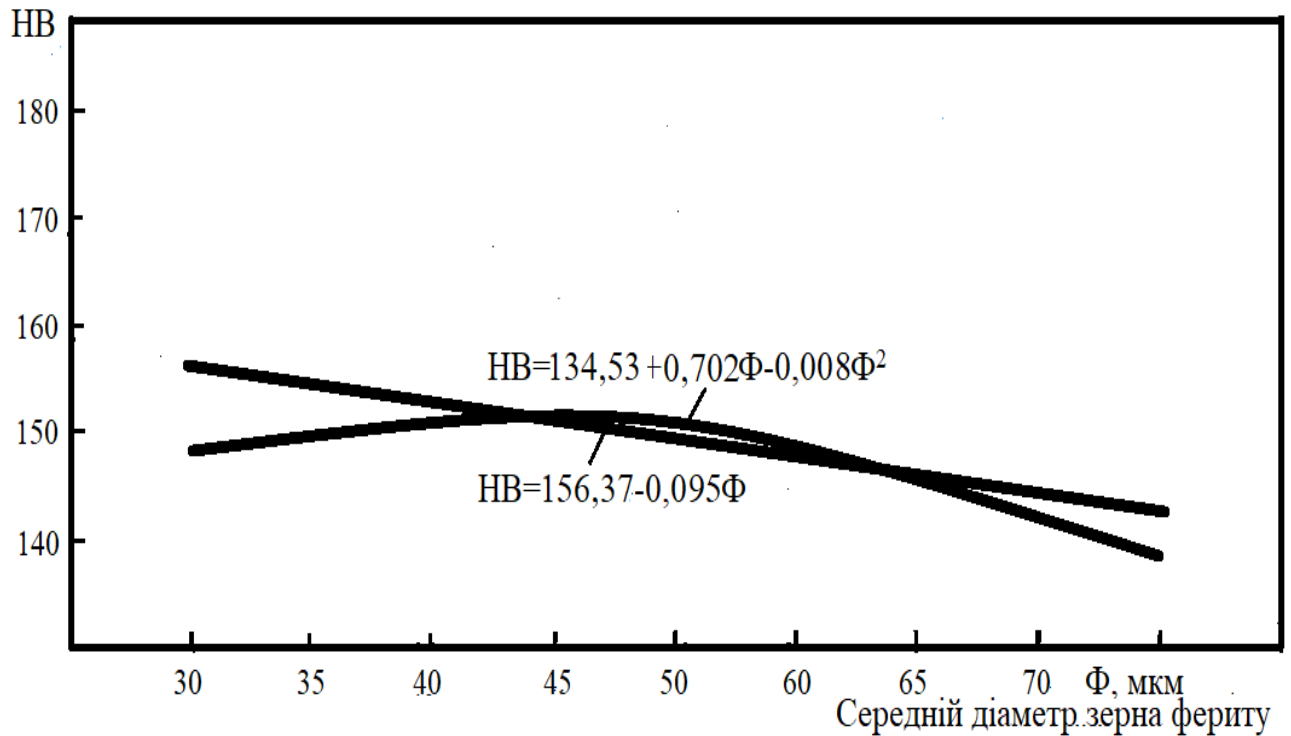


Рис. 4.4. Залежність розміру феритного зерна на твердість високоміцного чавуну

З рис. 4.4 підтверджується, що зміна розмірів феритного зерна в діапазоні від 30 до 45 мкм суттєвого впливу на твердість не виявляється. З збільшенням розміру феритного зерна вже більше 45 мкм, відповідно твердість високоміцного чавуну буде незначно знижуватися.

#### 4.5. Вплив діаметра графітних включень на їх число $N_{gp} = f(D_{gp})$

Залежність діаметра графітних включень високоміцного чавуну від їх числа представлено на рис. 4.5.

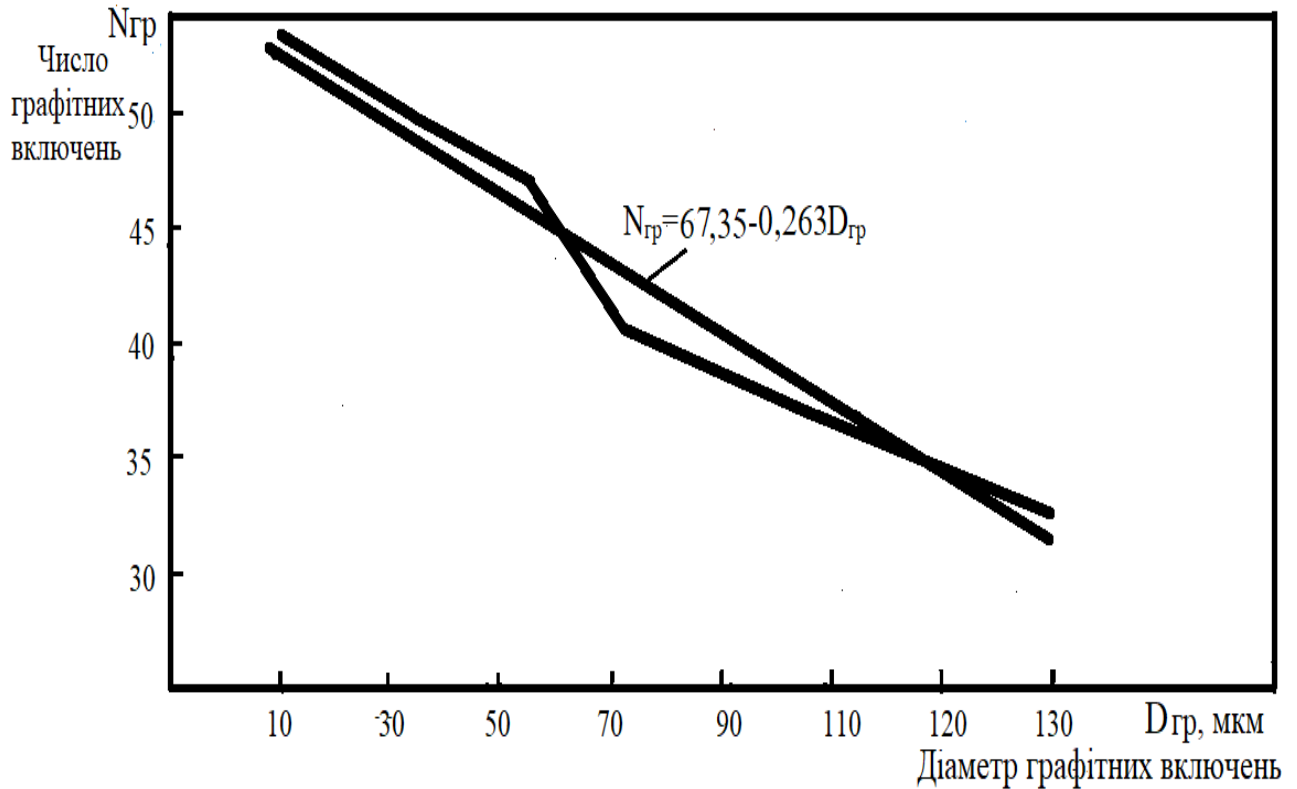


Рис. 4.5. Залежність діаметра графітних включень від їх числа, що приходить на  $1\text{ м}^2$  шліфу

З рис. 4.5 очевидно, що між числом та розміром графітних включень звичайно є тісний кореляційний зв'язок. Наявність такої кореляції підтверджується високим значенням коефіцієнта кореляції  $r = 0,3124$ .

Тому, пропорційно від зростання числа графітних включень буде зменшуватися їх розмір.

#### 4.6. Вплив кількості включень графіту на вміст перліту у високоміцному чавуні $\Pi = f(N_{gr})$

Залежність кількості включень графіту у високоміцному чавуні від вмісту перліту показано на рис. 4.6.

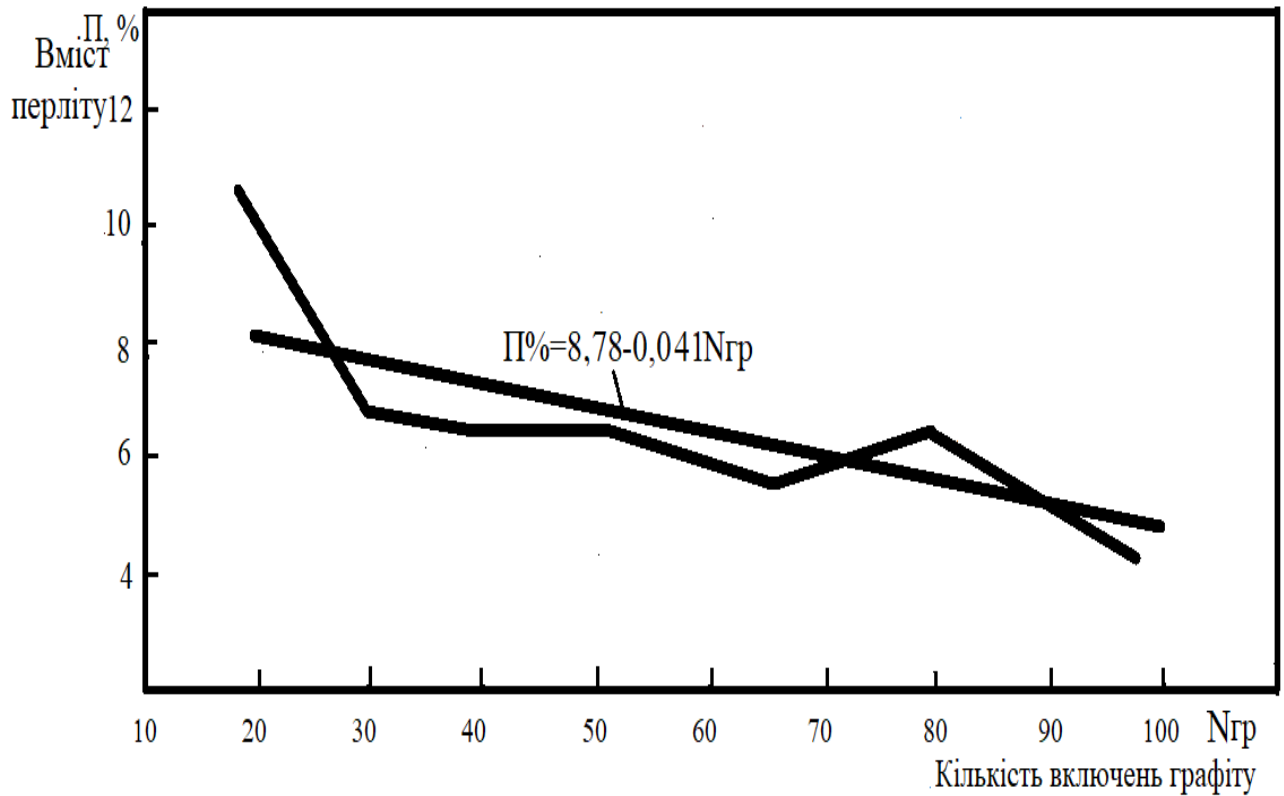


Рис. 4.6. Вплив кількості включень графіту на вміст перліту у високоміцному чавуні

З рис. 4.6 підтверджується, що з зростанням числа графітних включень звісно вміст перліту буде знижується.

#### 4.7. Вплив числа включень графіту на розмір зерна фериту

$$\Phi = f(N_{гр})$$

Залежність числа включень графіту від розміру зерна фериту показано на рис. 4.7.

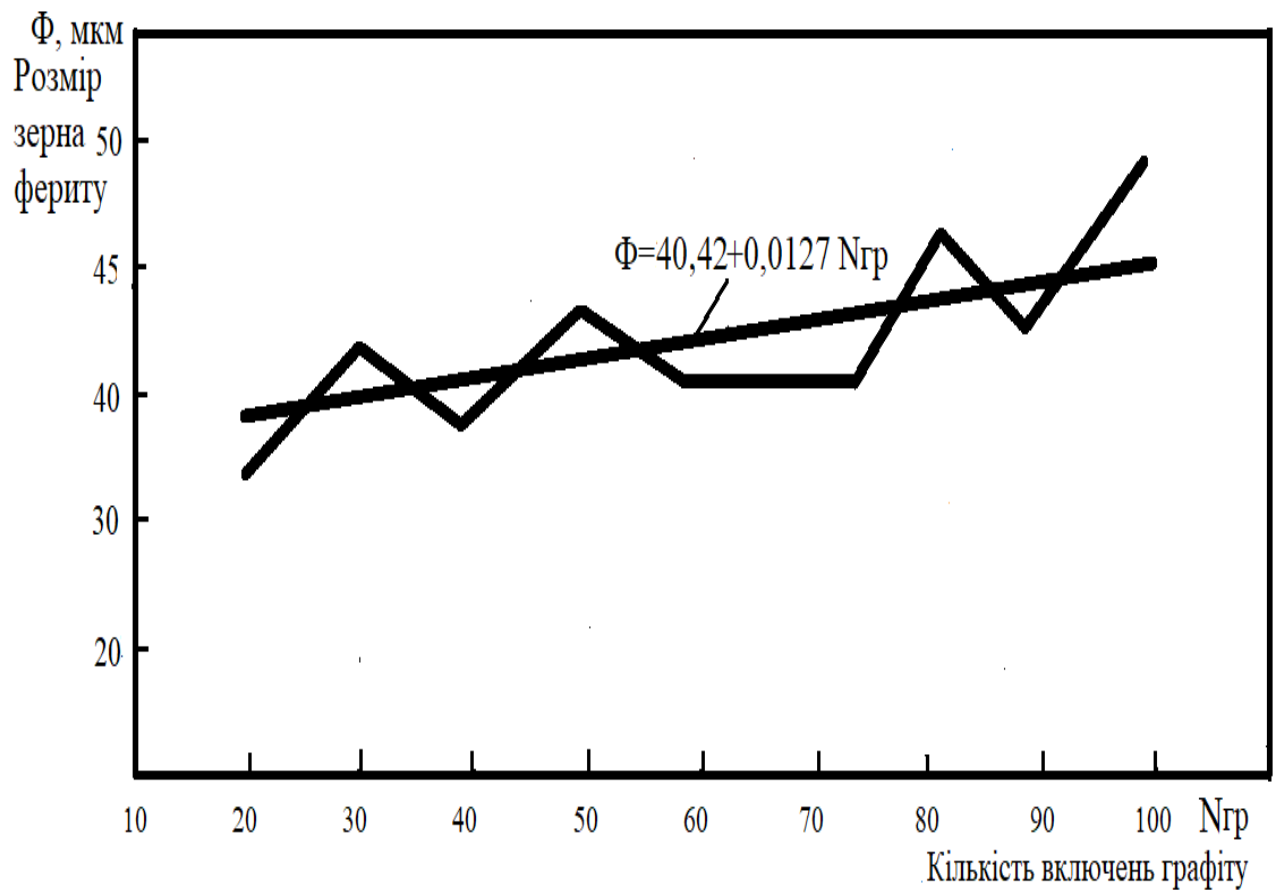


Рис.4.7. Вплив числа включень графіту на розмір зерна фериту

#### 4.8. Вплив вмісту перліту на середній діаметр графітних включень

$$D_{gp} = f(P)$$

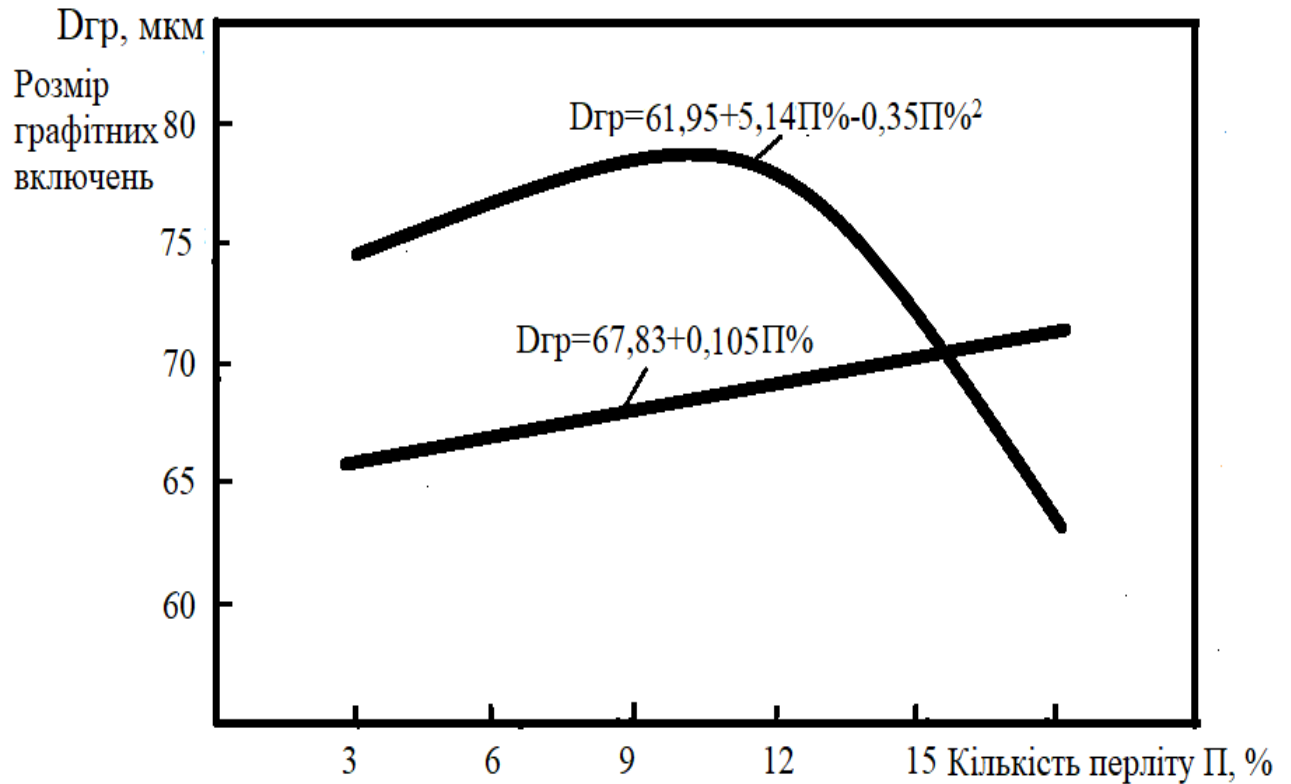


Рис. 4.8. Вплив вмісту перліту на середній діаметр графітних включень

З рис. 4.8 верифікація даних наступна, що при вмісті перліту до 10% збільшенням кількості перліту розмір графітних включень звісно збільшується, а вже при вмісті перліту більше 10% зростання його вмісту не призводить до суттєвої зміни розміру графітних включень.

З рис. 4.8 підтверджується, що емпірична лінія регресії має все ж таки вигляд, який більш близький буде до параболічної залежності, ніж звісно до прямолінійної.

#### 4.9. Вплив вмісту перліту на розмір феритного зерна високоміцного чавуну

$$\Phi = f(\Pi)$$

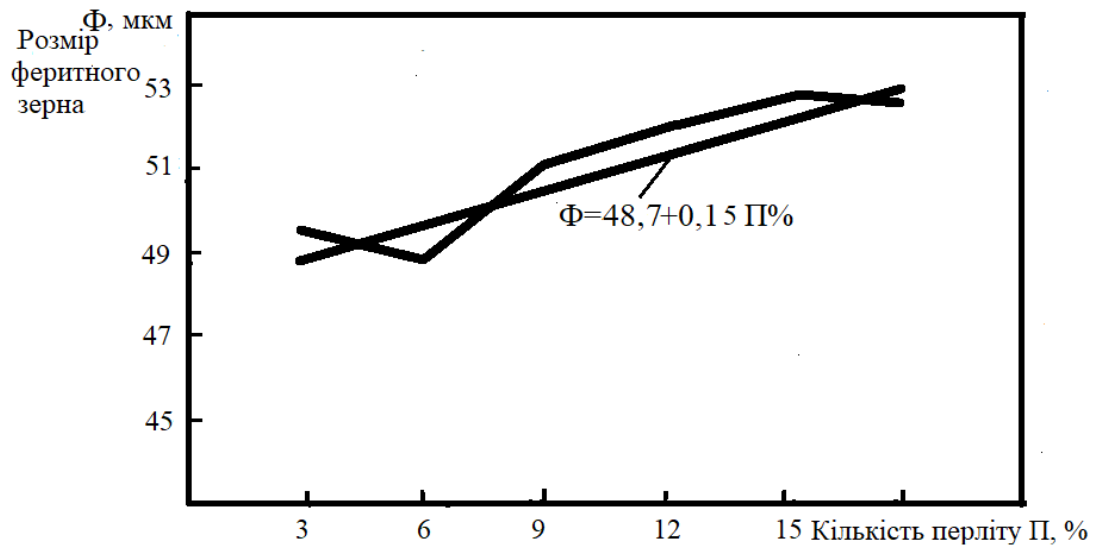


Рис. 4.9. Вплив вмісту перліту на розмір феритного зерна високоміцного чавуну

#### 4.10. Вплив розміру феритного зерна на діаметр виділень графіту високоміцного чавуну $D_{гр} = f(\Phi)$

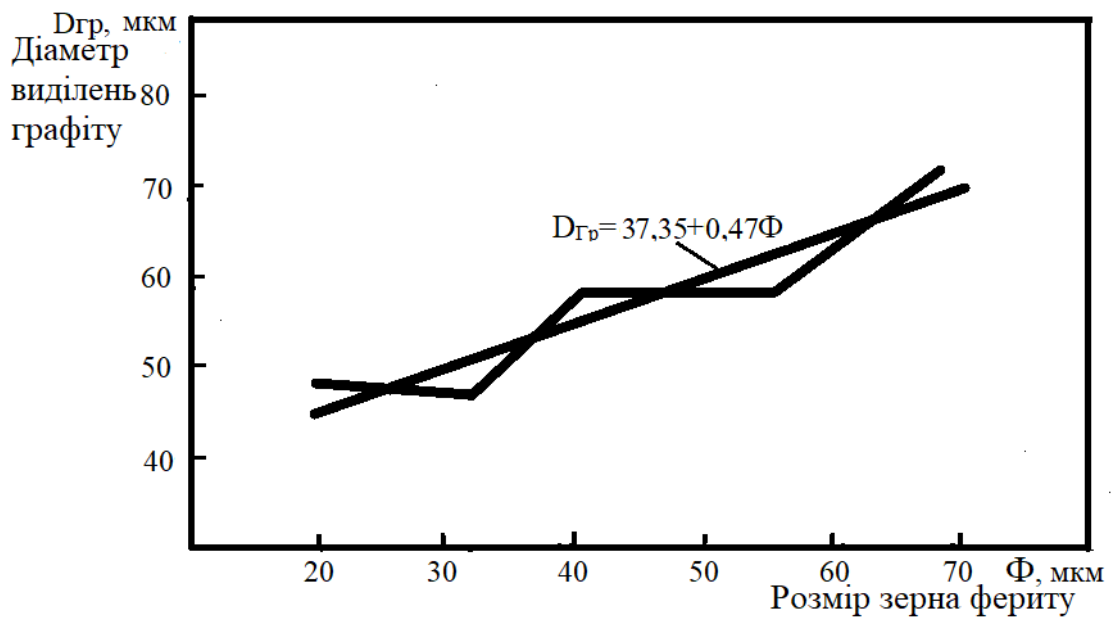


Рис. 4.10. Вплив розміру феритного зерна на діаметр виділень графіту високоміцного чавуну

Верифікація даних з рис. 4.10 показує, що в межах досліджуваної вибірки діаметр виділень графіту буде збільшуватися з збільшенням розміру феритного зерна високоміцного чавуну.

## ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі виконані дослідження впливу структури на твердість високоміцного чавуну. Провівши дослідження було встановлено та показано наступне, що структура високоміцного чавуну має істотний вплив на твердість.

З'ясовано, що при збільшенні розміру графітних включень до 85 мкм збільшується твердість високоміцного чавуну, а якщо графітні включення будуть більше 85 мкм, твердість звісно буде знижуватися. При дослідженні підтверджено, що твердість високоміцного чавуну знижується з збільшенням числа графітних включень та буде підвищуватися з збільшенням вмісту перліту, а також буде знижуватися з збільшенням розміру феритного зерна вже більше 45 мкм.

Показано також, що твердість високоміцного чавуну з збільшенням числа графітних включень звісно знижується за рахунок збільшення відповідно мікропористості металевої матриці.

При дослідженні також встановлено, що в межах досліджуваної вибірки твердість високоміцного чавуну підвищується з збільшенням вмісту перліту. При зростанні числа графітних включень видно, що вміст перліту знижується.

При варифікації даних для підвищення механічних властивостей високоміцного чавуну на основі проведених досліджень пропонується наступне: відповідно за критерій оцінки чавуну можна прийняти наступне – з збільшенням вмісту перліту твердість високоміцного чавуну підвищується.

Для одержання високоміцного чавуну з підвищеними механічними властивостями необхідно, щоб вміст вуглецю відповідав 3,3-3,8%, кремнію 1,9-2,6%. Вміст марганцю повинен бути в інтервалі 0,2-0,66%, а сірки 0,02% згідно ДСТУ 3925-99.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навч. посіб. К: Либідь, 2002. 328с.
2. Клименко В.М., Шиліна О.П, Осадчук А.Ю. Технологія конструкційних матеріалів. *Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво*: навч. посіб. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 97 с.
3. Єременко А.П. Виробництво виливків з чорних металів. *Виробництво виливків з чавуну*: конспект лекцій. Кам'янське: ДДТУ, 2017. 74 с.
4. Методичні вказівки з дисципліни “Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство” до виконання лабораторного практикуму з розділу “Вплив хімічного складу і температури на фазовий стан залізовуглецевих сплавів” / Укл.: Трофименко В.В., Клименко О.П., Овчаренко В.І. Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2014. 46 с.
5. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін Ливарні сплави та плавка чавунів та Основи теорії плавки та виробництва чавунних виливків для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка» та 136 «Металургія» всіх форм навчання / Укладачі: В.Г. Іванов, Є.М. Парахневич, С. О. Шустов. Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. 62 с.
6. Шигимага В.О. Основи матеріалознавства (метали): чавуни: метод. вказівки для самостійного вивчення дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навч., спец. 163 «Біомедична інженерія». Державний біотехнологічний університет. Харків. 2023. 21 с.
7. Шаповал С. В. Матеріалознавство: конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 122 с.
8. Іваненко І. М. Конструкційні матеріали у виробництвах неорганічних речовин [Електронний ресурс] : підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 242 с.
9. Хричиков В.Е., Меньяло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: навч. посіб. Видання друге, доопрацьоване. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. 89 с.

10. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Сайчук О.В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: монографія / за ред. д.т.н. проф. Скобло Т.С. Х: Діса плюс, 2019. 282 с.
11. Іванов В.Г., Парахнєвич Є.М., Шустов С.О. Ливарні сплави та плавка чавунів: метод. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. 62 с.
12. Акімов ВІ., Силованюк В.П., Волчков В.П., Івантишин Н.А. Вплив форми графітових включень на механічні властивості залізобуглецевих сплавів. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 2012. № 5. С. 61-66.
13. Бялік Г.А., Наумик В.В., Цивірко Е.І. Практикум з теорії ливарних сплавів та процесів: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. 98 с.
14. Матеріалознавство: навч. посіб. / Бузило В.І., Сердюк Б.П., Яворський А.В., Гайдай О.А. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243 с.
15. Державний стандарт України. ДСТУ3925-99:2000. Чавун з кулястим графітом для виливків. Загальнотехнічні умови. 2000.
16. Пріщенко О.Л., Черемська Н.В., Черногор Т.Т. Побудова математичних моделей за допомогою методів кореляційного і регресійного аналізу. *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах, 2011. №2 (1362). С. 29-36.
17. Перегуда О.В., Капустяк О.А., Курилко О.Б. Статистична обробка даних: навч. посіб. [Електронне видання]. 2022, 103с.
18. Бахрушин В.С. Методи аналізу даних: навч. посіб. Запоріжжя: КПУ, 2011. 268 с.
19. Руденко В.М. Математична статистика: навч. посіб. К.: ЦУЛ, 2012. 304 с.
20. Василенко О.А., Сенга І.А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях: навч. посіб. Одеса: ОНАО ім. О.С. Попова, 2011. 166 с.
21. Бухкало С.І., Іглін С.П. Деякі моделі дослідження структурно-хімічних змін при експлуатації полімерних виробів. *Інтегровані технології*, 2016. №3. С.52-57.

22. Назаренко Н. Можливості математичного пакету MATHCAD: збірник тез II Української конференції молодих науковців. Київ, 2015. С.181-183.
23. Дзись В.Г., Левчук О.В., Дячинська О.М. Прикладна математика на основі MathCAD: навч. посіб. Вінниця: ВНАУ, 2020. 378 с.
24. Босий М.В., Косінов А.Л., Каширін А.Д., Миронов Д.С., Лисенко А.Я. До питання дослідження механічних властивостей ковкого чавуну кореляційним і регресійним аналізом. // The 2th International scientific and practical conference “Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes” (November 18-20, 2024) Zurich, Switzerland. 2024. P. 239-241.
25. Босий М.В., Авраменко Є. В., Петренко О.О., Яцечко О.Ю., Бертінік В.В., Куроп'ятник Я.В. До питання впливу складу і структури на механічні властивості високоміцного чавуну. // 1-а Міжнародна науково-практична конференція «Current Challenges in Scientific Research», 6-8 жовтня Вроцлав, Польща. 2025. P. 202-205.

# ДОДАТКИ