

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:
Дослідження впливу структури феритного ковкого чавуну на
його твердість

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ПМ-23М-1
спеціальності 131
«Прикладна механіка»
_____ Артур КОСІНОВ
« ____ » _____ 20 ____ р.

Керівник магістерської роботи
Старший викладач
_____ Микола БОСІЙ
« ____ » _____ 20 ____ р.

Рецензент
канд. ф.-м. наук, доцент
_____ Володимир ПИРОГОВ
« ____ » _____ 20 ____ р.

м. Кропивницький -20____

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**

Косінов Артур Леонідович

1. Тема роботи: Дослідження впливу структури феритного ковкого 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 феритного ковкого чавуну.

Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методiku 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		

	керівнику		
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 БОСІЙ

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 20__ р.

Підпис здобувача

_____ Артур КОСІНОВ

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОВКОГО ЧАВУНУ	12
1.1. Вивчення впливу структури на твердість феритного ковкого чавуну	12
1.2. Вивчення впливу діаметра графітних включень та величини зерна на твердість феритного ковкого чавуну.....	13
1.3. Вивчення впливу між різними показниками механічних властивостей ковкого чавуну	14
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	15
2.1. Об'єкт і предмет дослідження	15
2.2. Методика і матеріал дослідження	15
2.3. Методика для отримання залежностей впливу структури феритного ковкого чавуну на його твердість.....	16
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВЛИВУ СТРУКТУРИ ФЕРИТНОГО КОВКОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО МІЦНІСТЬ	21
3.1. Вивчення впливу структури феритного ковкого чавуну на твердість (оброблення даних методом кореляції для залежності твердості ковкого чавуну від структури).....	21
3.1.1. Вплив кількості виділень графіту (N_{gr}) на твердість феритного ковкого чавуну	23
3.1.2. Вплив діаметра виділень графіту на твердість феритного ковкого чавуну.....	27
3.1.3. Вплив вмісту перліту на твердість феритного ковкого чавуну.....	30
3.1.4. Вплив середнього діаметра зерна фериту на твердість феритного ковкого чавуну.....	32
3.1.5. Одержання рівняння множинної кореляції твердості від структури феритного ковкого чавуну	35

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	55
4.1. Вплив кількості виділинь графіту на твердість ковкого чавуну	55
4.2. Вплив діаметра графітних вкляючень на твердість феритного ковкого чавуну	56
4.3. Вплив вмісту перліту на твердість феритного ковкого чавуну.....	57
4.4. Вплив розміру феритного зерна на твердість феритного ковкого чавуну	58
4.5. Вплив діаметра графітних вкляючень на їх число	59
4.6. Вплив кількості вкляючень графіту на вміст перліту у феритному ковкому чавуні.....	60
4.7. Вплив числа вкляючень графіту на розмір зерна фериту	61
4.8. Вплив вмісту перліту на середній діаметр графітних вкляючень	62
4.9. Вплив вмісту перліту на розмір феритного зерна ковкого чавуну	63
4.10. Вплив розміру феритного зерна на діаметр виділень графіту феритного ковкого чавуну.....	63
ВИСНОВКИ	65
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	66
ДОДАТКИ.....	69
Додаток 1. Довідка про публікацію.....	70

АНОТАЦІЯ

Косінов А. Л. Дослідження впливу структури феритного ковкого чавуну на його твердість, спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024. – 70 с. Матеріали ілюстрації 11 іл.

Метою даного дослідження є вивчення впливу структури феритного ковкого чавуну на його твердість. Дослідження проводяться методами математичної статистики, кореляційним аналізом в середовищі Microsoft Offis Excel та MathCADa.

Проведені дослідження: вплив кількості виділень графіту на твердість ковкого чавуну; вплив діаметра графітних включень ковкого чавуну на твердість; вплив вмісту перліта на твердість ковкого чавуну; вплив розміру феритного зерна на твердість ковкого чавуну; вплив діаметра графітних включень на їх число; вплив кількості включень графіту на вміст перліту у феритному ковкому чавуні; вплив числа включень графіту на розмір зерна фериту; вплив вмісту перліту на середній діаметр графітних включень; вплив вмісту перліту на розмір феритного зерна ковкого чавуну; вплив розміру феритного зерна на діаметр виділень графіту феритного ковкого чавуну. Отримано рівняння множинної кореляції залежності твердості від структури феритного ковкого чавуну.

З'ясовано, що при збільшенні розміру графітних включень до 80 мкм збільшується твердість ковкого чавуну, а якщо графітні включення будуть більше 80 мкм твердість починає знижуватися. При дослідженні твердість ковкого чавуну знижується зі збільшенням числа графітних включень та підвищується зі збільшенням вмісту перліта, а також знижується зі збільшенням розміру феритного зерна більше 40 мкм. Твердість ковкого чавуну знижується зі збільшенням числа графітних включень на 1 мм^2 . Твердість ковкого чавуну підвищується зі збільшенням вмісту перліту. Зі зростанням числа графітних включень вміст перліту знижується. При вмісті

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

феритний ковкий чавун, твердість, метод нормального розподілу, кореляція, рівняння регресії

ABSTRACT

Kosinov A. L. Study of the influence of the structure of ferritic ductile iron on its hardness, specialty 131 "Applied Mechanics", OPP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024. - 70p. Illustration materials 11 images.

The purpose of this study is to study the influence of the structure of ferritic ductile iron on its hardness. Research is carried out using the methods of mathematical statistics and correlation analysis in Microsoft Office Excel and MathCAD.

Conducted studies: the influence of the amount of graphite exudates on the hardness of ductile iron; influence of diameter of graphite inclusions of ductile iron on hardness; the effect of pearlite content on the hardness of ductile iron; the influence of ferrite grain size on the hardness of ductile iron; the influence of the diameter of graphite inclusions on their number; the influence of the number of graphite inclusions on the pearlite content in ferritic ductile iron; the influence of the number of graphite inclusions on the ferrite grain size; the effect of pearlite content on the average diameter of graphite inclusions; influence of pearlite content on ferrite grain size of ductile iron; the effect of ferrite grain size on the diameter of graphite allocations of ferritic ductile iron. The equation of the multiple correlation of hardness dependence on the structure of ferritic ductile iron was obtained.

It was found that when the size of graphite inclusions increases to 80 μm , the hardness of ductile iron increases, and if the graphite inclusions are larger than 80 μm , the hardness begins to decrease. When examined, the hardness of ductile 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 40 μm . The hardness of ductile iron decreases with an increase in the number of graphite inclusions per 1 mm^2 . The hardness of ductile iron increases with an increase in the pearlite content. As the number of graphite inclusions increases, the pearlite content decreases. With a pearlite content of up to 10%, the size of graphite inclusions increases as the amount of pearlite increases.

ferritic ductile iron, hardness, normal distribution method, correlation, regression equation

ВСТУП

Актуальність теми

Ковкий чавун з графітом пластівчастої форми за своїми властивостями визначається підвищеною пластичністю, міцністю та стійкістю до впливу зовнішнього середовища і стійкий проти зношування, а також має добрі ливарні властивості [1-5].

Отже, використання виливків із ковкого чавуну на виробництві пов'язано із виготовленням таких деталей, як колінчасті розподільні вали, поршні дизельних двигунів, коромисла клапанів, деталі зчеплення та деталі для сільськогосподарських машин [1-9].

Наразі значно виріс інтерес до феритного ковкого чавуну, особливо до формування його структури та його властивостей.

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

Недостатня увага приділяється процесам формування структури, а також, відповідно, твердості феритного ковкого чавуну. Тому, необхідно приділити увагу вивченню процесів лиття феритного ковкого чавуну, які пов'язані з теорією його утворення, а також кристалізації [1-9].

При одержанні феритного ковкого чавуну необхідно надавати вагомому значення до відповідних прийомів і методів структуроутворення.

Для дослідження феритного ковкого чавуну потрібно визначати оптимальні технологічні параметри, завдяки яким можливо регулювати структуру феритного ковкого чавуну для покращення його якості та зниження вартості.

На сучасному етапі дослідження впливу структури феритного ковкого чавуну на його твердість наразі є актуальним, першочергово це спрямовано на підвищення його властивостей в залежності від структури.

Мета та задачі дослідження

Мета дослідження – вивчення впливу структури на твердість феритного ковкого чавуну.

Для цього треба вирішити наступні *задачі*:

- вивчити вплив діаметра графітних включень на твердість феритного ковкого чавуну;
- вивчити вплив кількості виділинь графіту на твердість феритного ковкого чавуну;
- вивчити вплив вмісту перліту на міцність феритного ковкого чавуну;
- вивчити вплив розміру феритного зерна на твердість феритного ковкого чавуну;
- отримати рівняння множинної кореляції залежності твердості від структури ковкого чавуну;
- виконати розподіл значень показників, які характеризують структуру ковкого чавуну.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є феритний ковкий чавун. Предметом дослідження є вивчення впливу структури на твердість феритного ковкого чавуну.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше проведено вивчення впливу структури на твердість феритного ковкого чавуну приведеного складу: C = 2,5–3,5%; Si = 0,85–1,48%; Mn = 0,41–0,67%; до 0,15% S.

З'ясовано, що із структурних складових найбільший вплив на твердість феритного ковкого чавуну має вміст перліту.

Практичне значення отриманих результатів

Проведене дослідження впливу структури феритного ковкого чавуну на його твердість показує, що позитивний вплив на його твердість має форма графітових включень, а також їх розмір та вміст перліту.

Апробація результатів роботи

Результати роботи доповідались в 2024 році на 2-й Міжнародній науково-практичній конференції «Evolving Science: Theories, Discoveries and Practical Outcomes» яка відбулася 18-20 листопада 2024. Цюрих, Швейцарія. Отримано сертифікат (див. Додаток 1).

РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОВКОГО ЧАВУНУ

1.1. Вивчення впливу структури ковкого чавуну на його твердість

Ковкий чавун з різною структурною складовою буде мати і різні механічні властивості. Співвідношення між механічними властивостями ковкого чавуну, приведено в табл. 1.1 [8-10].

Таблиця 1.1

Структурні складові ковкого чавуну та їх властивості

Структурна складова	Механічні властивості	
	σ_B , кг/мм ²	HB
Перліт	49,1	150-207
Феріт	36,2	110-163

Аналізуючи табл. 1.1 маємо наступне, що підбираючи співвідношення між кількістю перліту та фериту, отримуємо відповідно ковкий чавун з необхідним оптимальним співвідношенням як твердості, так і міцності. Твердість ковкого чавуну буде підвищуватися зі збільшенням складу вуглецю, але це в свою чергу впливає і на зниження також його пластичних властивостей.

Особливо вагомий вплив на механічні властивості ковкого чавуну має щільність відливків. Графітова фаза є основним фактором, завдяки їй порушується щільність самої металевої матриці.

Деякі автори в літературних джерелах стверджують, що зі зменшенням розміру графітних включень маємо збільшення одночасно твердості та пластичності, це і буде вагомою особливістю феритного ковкого чавуну, який і відрізняється відповідно від інших сплавів та металів на основі заліза [11-14].

1.2. Вивчення впливу діаметра графітних включень та величини зерна на твердість ковкого чавуну

На твердість ковкого чавуну вагомий вплив має форма графітних включень, що видно із рис. 1. 1.

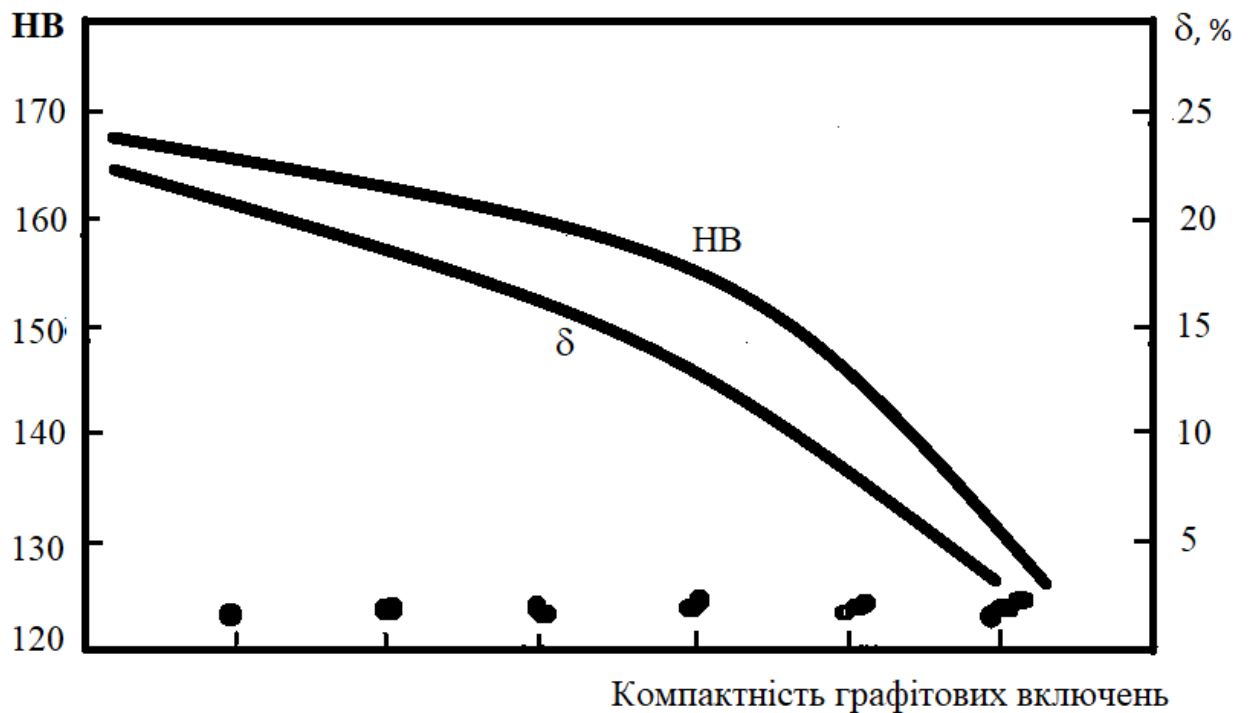


Рисунок 1.1 – Вплив компактності графітових включень на твердість ковкого чавуну

З рис. 1.1 слідує, що пластичність ковкого чавуну буде знижуватися при наближенні форми графітних включень до пластинчастих. На механічні характеристики ковкого чавуну має вплив зернистість механічної матриці, що можливо, як видно, при аналізі табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Вплив величини зерна на твердість та міцність чистого заліза

Середній діаметр зерна фериту, мм	σ_B , кг/мм ²	НВ	Середній діаметр зерна, мм	σ_B , кг/мм ²	НВ
9,7	16,8	116	0,2	26,8	143
7,0	30,6	128	0,16	27,0	156
2,5	39,5	135	0,11	28,4	165

1.3. Вивчення впливу між різними показниками механічних властивостей ковкого чавуну

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

Таблиця 1.3

Залежності між міцністю, твердістю та пластичністю чавунів

Вид чавуну	Залежність
Феритний ковкий чавун	$\sigma_B = 14 + 0,2 \text{ НВ}$ $\delta \% = 0,3 + 0,2 \text{ НВ}$
Чавун з кулястим графітом	$\sigma_B = 68,5 - 0,06 \text{ НВ}$ $\delta \% = 5,76 - 0,017 \text{ НВ}$

Відповідні залежності такого виду будуть специфічні для конкретних умов виробництва та застосування в визначених зонах зміни показників механічних властивостей ковкого чавуну (табл. 1.3).

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом проведення дослідження є феритний ковкий чавун з наступним хімічним складом згідно ДСТУ EN 1562:2019 $C = 2,5\text{--}3,4\%$; $Si = 0,75\text{--}1,45\%$; $Mn = 0,41\text{--}0,66\%$; $S = \text{до } 0,17\%$; $P = \text{до } 0,14\%$; [15], який широко використовується в промисловості. Феритний ковкий чавун отримується шляхом процесу графітизуючого відпалу білого чавуну. *Предметом дослідження* є вивчення впливу структури на твердість феритного ковкого чавуну.

Феритний ковкий чавун одержується з білого доевтектичного чавуну, графітизуючим відпалом його на феритний ковкий чавун. В процесі виробництва зв'язаний вуглець відповідно знаходиться у виді цементиту, потім розпадається та виділятиметься як включення графіту наступної пластівчастої форми, тобто у вигляді вуглецю відпалу $Fe + C_{\text{від}} \rightarrow Fe_3C$. На рис. 2.1. представлено процес одержання феритного ковкого чавуну з білого чавуну.

2.2. Методика і матеріал дослідження

В процесі дослідження феритного ковкого чавуну на твердість відливаються стандартні зразки згідно з ДСТУ EN 1562:2019. Випробування зразків на твердість виконували згідно ДСТУ EN 1562:2019 у випробувальній лабораторії на твердість ковкого чавуну, а результати фіксували в протоколах [15].

2.3. Методика для отримання залежностей впливу структури ковкого чавуну на його механічні властивості

В залежності від структури феритного ковкого чавуну вивчають його властивості, які безпосередньо впливають на якості чавуну. Отже, необхідно розробляти та вдосконалювати методи для більш ефективних технологічних процесів виготовлення ковкого чавуну.

Застосовуючи методи теорії кореляції та регресійного аналізу проводили вивчення впливу структури на твердість феритного ковкого чавуну [15-20].

Залежності твердості ковкого чавуну від його структури знаходили, використовуючи апроксимуючі наступні функції [15, 16, 20]:

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

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

Регресійні моделі будуюмо за допомогою методів кореляційного аналізу, виявлення кореляційного зв'язку між параметрами. Регресійний аналіз впливу структури на твердість феритного ковкого чавуну полягає у встановленні зв'язку між незалежними змінними X_i , значення яких можуть змінюватись від залежної змінної Y_i та визначенні параметрів математичних моделей і виконання перевірки моделі на адекватність [16-19].

Рівняння регресії наведемо у наступному виді:

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

В цьому рівнянні коефіцієнти b_0, b_1 є невідомими.

Потім представимо рівняння регресії у такому виді

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

Розрахунок коефіцієнтів b_0, b_1 виконуємо за такими виразами

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}; \quad (2.5)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (2.6)$$

Наприклад, залежність між вхідними і вихідними параметрами можливо задати у вигляді такого рівняння регресії [16-19]:

$$y = b_2 x^2 + b_1 x + b_0. \quad (2.7)$$

Коефіцієнти наведеної вище регресійної моделі визначаємо таким чином:

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2)^2 \rightarrow \min. \quad (2.8)$$

Визначаємо коефіцієнти регресії b_0 , b_1 , b_2 з системи рівнянь, використовуючи метод єдиного ділення Гауса і тоді знаходимо коефіцієнти апроксимуючої функції.

Застосувавши коефіцієнт кореляційного відношення Пірсона, визначаємо тісноту зв'язку між параметрами x і y [16-20].

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.9)$$

де n – кількість спостережень у самій вибірці; $i = 1, 2, \dots, 100$ – номер спостережень; x_i – значення вмісту елементу в феритному ковкому чавуні в i -ому спостереженні; $\bar{x}$, $\bar{y}$ – це математичне очікування параметрів x , y ;

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (2.10)$$

y_i – значення твердості ковкого чавуну;

$$r = b \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}, \quad (2.11)$$

b – коефіцієнт регресії при параметрі x

σ_x^2 – дисперсія параметра x :

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (2.12)$$

σ_y^2 – дисперсія параметра y :

Кореляційне відношення нелінійних залежностей

$$\eta = \frac{\sigma^2(y_{\text{per}})}{\sigma^2(y)}, \quad (2.13)$$

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

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

$$\sigma^2(y_{\text{per}}) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{per}})^2 \right] - \bar{y}^2; \quad (2.14)$$

$$\sigma^2(y) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] - \bar{y}^2. \quad (2.15)$$

Статистичну значущість коефіцієнтів парної кореляції знаходимо за відповідними методиками [16, 17].

Лінійну кореляційну залежність між величинами x і y перевіряємо за визначеним коефіцієнтом кореляції [16-20]

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i y_i - \bar{x} \bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (2.16)$$

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

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}; \quad (2.17)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}. \quad (2.18)$$

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

Для оцінювання величин b_1, b_0 у рівнянні (2.3) можна застосувати МНК [16-21].

Перевірка відповідно значущості коефіцієнтів регресії виконується таким чином:

– знаходимо середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad (2.19)$$

– знаходимо похибку коефіцієнта b_0

$$\sigma_{b_0} = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}; \quad (2.20)$$

– знаходимо похибку коефіцієнта b_1 .

$$\sigma_{b_i} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (2.21)$$

За t -критерієм Стюдента можна знайти, чи значущі коефіцієнти регресії, чи ні [16-21]

$$t_p = \frac{b_i}{\sigma_{b_i}}. \quad (2.22)$$

Розраховане значення t -критерію Стюдента відповідно порівнюється з табличним значенням критерію. Значення t -критерію Стюдента за таблицями можна знаходити для відповідних чисел ступенів вільності $f = N - 1$ та рівня значимості $\alpha = 0,05$. Коефіцієнти b_i будуть відповідно статистично значимими при $t_p \geq t_{\text{табл.}}$, а статистично не значимі при $t_p \leq t_{\text{табл.}}$.

Адекватність математичної моделі визначається за критерієм Фішера [16-21]

$$F_p = \frac{(n-2)\left(\sum_{i=1}^n y_i^2\right) - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x - b_0)}. \quad (2.23)$$

Критерій Фішера F_p – вказує на розподіл Фішера із відповідними ступенями вільності $f_1 = n - 1$, $f_2 = n - k$. При рівні значущості $\alpha = 0,05$ за таблицями для розподілу Фішера далі знаходимо $F_{\text{табл.}}$. якщо $F_p \geq F_{\text{табл.}}$ маємо неадекватне рівняння регресії, а вже коли $F_p \leq F_{\text{табл.}}$ рівняння регресії буде дійсно адекватне.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ КОВКОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО ТВЕРДІСТЬ

3.1. Вивчення впливу структури феритного ковкого чавуну на твердість (оброблення даних методом кореляції для залежності твердості ковкого чавуну від структури)

При вивченні впливу структури феритного ковкого чавуну на твердість були побудовані кореляційні таблиці (табл. 3.1, 3.2, 3.3, 3.4) парних залежностей: $HB = f(N_{тр})$; $HB = f(D_{тр})$; $HB = f(П\%)$ та $HB = f(\Phi)$. До цих таблиць вносили показники механічних властивостей зразків, які не мають дефектів та задовольняють вимогам ДСТУ.

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

Рівняння теоретичної лінії регресії визначали із співвідношення:

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

де c_y —середнє значення факторної ознаки в нульовому інтервалі;

i_y — ширина інтервалу за результативною ознакою;

i_x — ширина інтервалу за факторною ознакою;

a' і b' — коефіцієнти, які визначаються з наступної системи рівнянь:

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

де всі величини беруться із кореляційних таблиць.

Коефіцієнт парної кореляції r визначали із співвідношення:

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

де всі величини беруться із кореляційних таблиць.

Для криволінійних залежностей складали розширені кореляційні таблиці (табл. 3.9, 3.11).

Рівняння теоретичної лінії регресії у вигляді квадратичної функції $y = a + bx + cx^2$ визначали із співвідношення:

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

де C_y – середнє значення результативної ознаки в нульовому інтервалі;

C_x – середнє значення факторної ознаки в нульовому інтервалі;

i_y – ширина інтервалу за результативною ознакою;

i_x – ширина інтервалу за факторною ознакою;

a' , b' і c' – коефіцієнти, які визначені з наступної 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 всі величини беруться з кореляційних таблиць.

Тіснота зв'язку у випадку параболічної залежності визначалась за допомогою теоретичного кореляційного відношення

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

де σ'^2 – загальна дисперсія, визначена із співвідношення:

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

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

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

3.1.1. Вплив кількості виділень графіту ($N_{\text{гр}}$) на твердість феритного ковкого чавуну

Для вивчення впливу кількості виділень графіту на твердість феритного ковкого чавуну була побудована кореляційна таблиця (табл. 3.1) та знайдена аемпірична лінія регресії (табл. 3.1).

Для визначення рівняння теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти: $a' = 1,2968$ та $b' = 0,1937$.

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд: $HB = 139,68 + 0,136N_{\text{гр}}$.

Емпірична і теоретична лінії регресії залежності $HB = f(N_{\text{гр}})$ наведені на рис. 4.1.

Для встановлення тісноти зв'язку був розрахований коефіцієнт кореляції

$$r = 0,2463.$$

Перевірку гіпотези про наявність кореляції між твердістю і кількістю виділень графіту проводимо за допомогою t -критерію Стюдента, який визначається з наступного співвідношення:

$$t_{\text{роз}} = \frac{121}{\sqrt{1-r^2}} \sqrt{n-2} = \frac{0,24629}{\sqrt{1-0,24629}} \sqrt{309-2} = 4,48.$$

При цьому табличне значення t -критерію Стьюдента $t_{\text{табл}} = 1,96$.

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

За t -критерієм Фішера за виразом (2.23) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо $F_{\text{р.}} = 1,34 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то 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 \ $N_{\text{гp}}$	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	m_y	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
-1	114 – 121	–	–1 1	–	–	–	–	–	–	1	-1	1
0	121 – 128	–	6	34	22	25	13	15	13	128	0	0
1	128 – 135	1 1	8 8	17 17	27 27	13 13	7 7	9 9	2 2	84	84	84
2	135 – 142	2 1	6 3	10 5	10 5	12 6	6 3	6 3	–	26	52	104
3	142 – 149	–	24 8	42 14	15 5	18 6	24 8	6 2	1 3	44	132	396
4	149 – 156	–	32 8	12 3	8 2	20 5	–	–	–	18	72	288
5	156 – 153	5 1	15 3	10 2	–	10 2	–	–	–	8	40	200
m_x		3	37	75	61	57	31	26	16	309	379	1073
$\Sigma m_{xy} y'$		8	84	91	60	73	37	21	5	379	–	–
$\bar{y}'_x = \frac{\Sigma m_{xy} y'}{m_x}$		2,67	2,27	1,21	0,98	1,28	1,19	0,72	0,31	10,63	–	–

$\bar{y}_x = y_0 + \bar{y}'_x i_y$	143,19	140,39	132,97	131,46	133,46	132,83	129,54	126,67	1070	—	—
$m_x x'$	-9	-74	-75	0	57	62	87	64	112	—	—
$m_x x'^2$	27	148	150	0	57	124	261	256	1023	—	—
$x' \sum m_{xy} y'$	-24	-168	-91	0	73	74	63	20	-53	—	—

3.1.2. Вплив діаметра виділень графіту на твердість ферритного ковкого чавуну

Для вивчення впливу кількості виділень графіту на твердість ферритного ковкого чавуну була побудована кореляційна таблиця (табл. 3.2) та знайдена емпірична лінія регресії (рис. 3.2).

Для визначення теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти:

$$a' = 1,2623; b' = 1,2623.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$HB = 129,11 + 0,063D_{\text{гр}}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1199.$$

Перевірка за допомогою t -критерію Стьюдента підтверджує наявність кореляції між твердістю і діаметром виділень графіту [16-21].

Емпірична і теоретична лінії регресії $HD = f(D_{\text{гр}})$ наведені на рис. 4.2, з якого видно, що емпірична лінія регресії має форму, близьку до параболічної.

Для перевірки гіпотези про параболічну залежність твердості ферритного ковкого чавуну від діаметра графітних включень розширюємо кореляційну таблицю (табл. 3.2).

Для одержання теоретичної регресії у вигляді параболи розраховуємо коефіцієнти: $a' = 1,3852$; $b' = 0,1479$; $c' = 0,0745$.

Теоретична лінія регресії, що наведена на рис. 4.2, має вид:

$$HB = 118,98 + 0,038D_{\text{гр}} - 0,002D_{\text{гр}}^2.$$

Кореляційне відношення дорівнює: [16-21].

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\frac{18,5824}{325}}{\frac{1169}{325} - \left(\frac{411}{325}\right)^2}} = 0,169.$$

Таблиця 3.2

Кореляція між твердістю і діаметром графітних включень

y'	x'	-2	-1	0	1	2	3	4	Всього		
	HB $\backslash$ $D_{\text{гп}}$	30-45	45-60	60-75	75-90	90-105	105-120	120-135	m_y	$m_y y'$	$m_y \cdot y'^2$
-1	114 – 121	–	–	–	$\begin{smallmatrix} -1 \\ 1 \end{smallmatrix}$	–	1	–	1	-1	1
0	121 – 128	38	17	43	12	22	0,1584	–	132	–	–
1	128 – 135	$\begin{smallmatrix} 9 \\ 9 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 10 \\ 10 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 37 \\ 37 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 13 \\ 13 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 16 \\ 16 \end{smallmatrix}$	–	$\begin{smallmatrix} 2 \\ 2 \end{smallmatrix}$	87	87	87
2	135 – 142	$\begin{smallmatrix} 8 \\ 4 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 12 \\ 6 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 8 \\ 4 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 16 \\ 8 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 6 \\ 3 \end{smallmatrix}$	–		25	50	100
3	142 – 149	$\begin{smallmatrix} 12 \\ 4 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 24 \\ 8 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 75 \\ 25 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 24 \\ 8 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 18 \\ 6 \end{smallmatrix}$	–	$\begin{smallmatrix} 6 \\ 2 \end{smallmatrix}$	53	159	477
4	149 – 156	$\begin{smallmatrix} 12 \\ 3 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 12 \\ 3 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 24 \\ 6 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 8 \\ 2 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 20 \\ 5 \end{smallmatrix}$	–	–	19	76	304
5	156 – 163	–	–	$\begin{smallmatrix} 30 \\ 6 \end{smallmatrix}$	$\begin{smallmatrix} 10 \\ 2 \end{smallmatrix}$	–	–	–	8	40	200
m_x		58	44	121	46	52	1,1584	4	325*	414*	1169*
$\sum m_{xy} y'$		41	58	174	70	60	–	8	411*	–	–

$\bar{y}'_x = \frac{\sum m_{xy}y'}{mx}$	0,706	1,318	1,438	1,521	1,153	—	2	6,136	—	—
$\bar{y}_x = y_0 + \bar{y}'_x i_y$	127,97	133,73	134,57	135,15	132,57	—	138,5	934,64	—	—
$m_x x'$	-116	-44	0	46	104	—	16	6	—	—
$m_x x'^2$	232	44	0	46	208	—	64	594	—	—
$m_{xy} y' x'$	-82	-58	0	70	120	—	32	82	—	—
$m_x x'^3$	-464	-44	0	46	416	—	256	210	—	—
$m_x x'^4$	928	44	0	46	832	—	1024	2874	—	—
$m_{xy} y' x'^2$	164	58	0	70	240	—	128	660	—	—
$\bar{y}'_x = \frac{y_x - y_0}{i_y - m_x}$	0,7914	1,1628	1,3852	1,4586	1,3841	1,1584	0,7843	Визначаємо із співвідношення $\bar{y}'_x = \frac{y_x - y_0}{i_y - m_x}$		
$(\bar{y}'_x - \bar{y}')^2 m_x$	12,9862	0,4532	1,7545	1,72926	0,7384	—	0,9208	18,5824	—	—
$\bar{y}_x$	130,04	132,64	134,2	134,71	134,19	132,61	129,99	Визначаємо за теоретичною лінією регресії квадратичної параболи		

Оскільки розраховане кореляційне відношення виявилось вище за коефіцієнт кореляції, то гіпотеза про криволінійну залежність твердості від розміру графітних включень підтверджується.

3.1.3 Вплив вмісту перліту на твердість ферритного ковкого чавуну

Для вивчення впливу кількості перліту на твердість ферритного ковкого чавуну була побудована кореляційна таблиця (табл. 3.3) і знайдена емпірична лінія регресії.

Для значення рівняння теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти [16-21]

$$a' = 1,1019; b' = 0,3944.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд $HB = 128,07 + 0,92P\%$.

Емпірична і теоретична лінії регресії залежності $HD = f(P\%)$ наведені на рис. 4.3.

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	121 – 128	40	39	27	6	7	119	0	0
1	128 – 135	6	38	17	11	2	74	74	74
2	135 – 142	6	20	32	4	–	31	62	124
3	142 – 149	6	63	39	18	9	45	135	405
4	149 – 156	–	20	24	4	16	16	64	256
5	156 – 153	–	10	15	5	15	9	45	225
m_x		51	115	82	27	19	294	380	1084
$m_{xyy'}$		18	151	127	42	42	380	–	–
$\bar{y}'_x$		0,35	1,31	1,55	1,56	2,21	6,98	–	–
$\bar{y}_x$		126,95	133,67	135,35	135,42	139,97	671,4	–	–
$m_x x'$		-51	0	82	54	57	142	–	–
$m_x x'^2$		51	0	82	108	171	412	–	–
$x' \sum m_{xyy'}$		-18	0	127	84	126	319	–	–

Для встановлення тісноти зв'язку був розрахований коефіцієнт кореляції:

$$r = 0,3002.$$

Перевірка кореляції за допомогою t -критерію Стюдента підтверджує наявність кореляції між твердістю та вмістом перліту: [16-21]

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,3002}{\sqrt{1 - 0,3002^2}} \cdot \sqrt{295} = 5,4 > t_{\text{табл}} = 1,96.$$

За t -критерієм Фішера за виразом (2.23) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо $F_p = 1,63 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то рівняння регресії адекватне.

3.1.4. Вплив середнього діаметра зерна фериту на твердість феритного ковкого чавуну

Для вивчення впливу розміру феритного зерна на твердість ковкого чавуну була побудована кореляційна таблиця (табл. 3.4) та знайдена емпірична лінія регресії [16-21].

Для визначення емпіричної лінії регресії були знайдені коефіцієнти

$$a' = 1,171; b' = -0,06627.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд $HB = 136,647 - 0,093\Phi$.

Коефіцієнт кореляції дорівнює

$$r = -0,08184.$$

Перевіряємо наявність кореляції між твердістю і розміром феритного зерна за допомогою t -критерію Стюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,08184}{\sqrt{1 - 0,08184^2}} \cdot \sqrt{331} = 1,46.$$

Так як $t_{\text{роз}} < t_{\text{табл}} = 1,96$, то лінійна кореляція між досліджуваними факторами відсутня.

Перевіряємо наявність кореляції між твердістю і розміром феритного зерна у вигляді параболічної залежності [16-21].

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

$$HB = 124,37 + 0,507\Phi - 0,007\Phi^2.$$

Теоретична лінія регресії наведена на рис. 4.4.

Кореляційне відношення дорівнює

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\frac{7,2884}{333}}{\frac{1125}{333} - \left(\frac{401}{333}\right)^2}} = 0,106.$$

Таблиця 3.4

Кореляція між твердістю і середнім діаметром зерна фериту в мкм

y'	x'	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	Всього		
	Φ НВ	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	114 – 121	–	–	–1 1	–	–	–	–	–	1	-1	1
0	121 – 128	9	4	1	61	1	16	2	8	139	–	–
1	128 – 135	10 10	32 32	5 5	34 34	–	8 8	1 1	3 3	93	93	93
2	135 – 142	12 6	8 4	2 1	16 8	–	6 3	2 1	4 2	25	50	100
3	142 – 149	12 4	36 12	6 2	78 26	–	18 6	–	–	50	150	450
4	149 – 156	4 1	24 6	–	32 8	4 1	–	–	–	16	64	256
5	156 – 163	–	25 5	5 1	10 2	–	5 1	–	–	9	45	225
m_x		30	100	11	139	2	34	4	13	333	401	1125
$m_{xy} y'$		38	125	17	170	4	37	3	7	401	–	–
$\bar{y}'_x$		1,27	1,25	1,54	1,22	2	1,09	0,75	0,54	9,66	–	–
$\bar{y}_x$		133,39	133,25	135,28	133,04	138,5	132,13	129,75	128,28	1064	–	–

$m_x x'$	-90	-200	-11	0	2	68	12	52	-167	—	—
$m_x x'^2$	270	400	11	0	2	136	36	208	1063	—	—
$m_{xy} y' x'$	-114	-250	-17	0	4	74	9	28	-266	—	—
$m_{xy} y' x'^2$	342	500	17	0	4	148	27	112	1150	—	—
$m_x x'^3$	-810	-800	-11	0	2	272	108	832	-407	—	—
$m_x x'^4$	2430	1600	11	0	2	544	324	3328	8239	—	—
$\bar{y}'_x$	1,2186	1,279	1,291	1,253	1,165	1,0274	0,839	0,601	8,664	—	—
$(\bar{y}'_x - \bar{y}')^2 m_x$	0,0861	0,55	0,083	0,3197	0,003	1,0642	1,533	4,7294	7,2884	—	—

Так як кореляційне відношення більше за коефіцієнт кореляції, то гіпотеза про наявність кореляції у вигляді параболічної залежності між твердістю і розміром феритного зерна більш достовірна, ніж гіпотеза про прямолінійну залежність.

3.1.5. Одержання рівняння множинної кореляції твердості від структури феритного ковкого чавуну

Щоб отримати загальну картину впливу структури на твердість феритного ковкого чавуну, було одержано рівняння множинної кореляції.

Рівняння множинної кореляції в стандартизованому масштабі має наступний вид: [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 при даних значеннях факторних ознак;

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

β_i – стандартизований коефіцієнт множинного зв'язку.

Множинний коефіцієнт кореляції визначали за формулою:

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

Стандартизовані коефіцієнти множинного зв'язку β_i визначають з наступної системи рівнянь:

[illegible]

Коефіцієнти рівняння множинної кореляції, що виражені 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 – вільний член рівняння множинної кореляції;

$\bar{x}_{1,2,3,\dots,k}$ – середнє арифметичне значення результативної ознаки;

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

Для одержання рівняння множинної кореляції були побудовані кореляційні таблиці 3.5-3.10 для підтвердження гіпотези про наявність кореляційного зв'язку між факторними ознаками.

Для визначення наявності кореляції між числом та діаметром графітних включень була побудована кореляційна табл. 3.5 і знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.5).

Для визначення теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти

$$a' = 1,4325; b' = -0,3786.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$N_{\text{гр}} = 66,36 - 0,2524 D_{\text{гр}}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = -0,2998.$$

Розрахунковий t -критерій Стьюдента дорівнює

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,2998}{\sqrt{1 - 0,2998^2}} \cdot \sqrt{418} = 6,3.$$

Так як $t_{\text{роз}} > t_{\text{табл}} = 1,96$, то між діаметром і числом графітних включень існує кореляція [16-20].

За t -критерієм Фішера за виразом (2.23) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо $F_{\text{р.}} = 0,67 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.5

Кореляція між діаметром і числом графітних включень

y'	x'	-2	-1	0	1	2	3	Всього		
	$N_{rp} \backslash D_{rp}$	30-45	45-60	60-75	75-90	90-105	120-135	m_y	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
-2	10-20	–	–2 1	–	–6 3	–4 2	–	6	-12	24
-1	20-30	–5 5	–4 4	–19 19	–4 4	–17 17	3 3	52	-52	52
0	30-40	10	11	29	18	21	–	89	0	0
1	40-50	11 11	11 11	32 32	12 12	17 17	–	83	83	83
2	50-60	40 20	34 17	48 24	10 5	18 9	4 2	77	154	308
3	60-70	30 10	18 6	66 22	18 6	9 3	–	47	141	423
4	70-80	48 12	32 8	68 17	16 4	16 4	–	45	180	720
5	80-90	45 9	20 4	25 5	5 1	10 2	–	21	105	525
m_x		77	62	148	53	75	5	420	599	2135
$m_{xy} y'$		169	109	220	51	49	1	599	–	–
$\bar{y}'_x$		2,19	1,76	1,49	0,96	0,65	0,2	7,25	–	–

$\bar{y}_x$	56,9	52,6	49,9	44,6	41,5	37	282,5	—	—
$m_x x'$	-154	-62	0	53	150	20	7	—	—
$m_x x'^2$	308	62	0	53	300	80	803	—	—
$m_{xy} y' x'$	-338	-109	0	51	98	4	-294	—	—

Для знаходження кореляційної залежності між кількістю включень графіту і вмістом перліту була побудована кореляційна табл. 3.6 і знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.6).

Для визначення теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти:

$$a' = 0,6804; b' = -0,1875.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\text{П\%} = 7,67 - 0,038 N_{\text{гр}}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює

$$r = -0,1889.$$

Перевіряємо наявність кореляції між кількістю перліту та числом графітних включень за допомогою t -критерію Стьюдента [16-20].

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1889}{\sqrt{1 - 0,1889^2}} \cdot \sqrt{410} = 4,08.$$

Так як $t_{\text{роз}} > t_{\text{табл}} = 1,96$, то гіпотеза про наявність кореляції між вмістом перліту і числом графітних включень підтверджується.

За t -критерієм Фішера за виразом (2.23) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо $F_{\text{р.}} = 0,77 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то рівняння регресії адекватне.

Для підтвердження гіпотези про наявність кореляційного зв'язку між кількістю включень графіту і розміром феритного зерна була побудована кореляційна табл. 3.7 та знайдена емпірична лінія регресії.

Таблиця 3.6

Кореляція між вмістом перліту і кількістю включень графіту

y'	x'	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	Всього		
	$\Pi\% \quad N_{\text{гр}}$	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	m_y	$m_y y'$	$m_y \cdot y'^2$
-2	0-2	–	–4 2	–6 3	–14 7	–14 7	–10 5	–4 2	–2 1	–4 2	29	-58	116
-1	2-4	–	–8 8	–27 27	–22 22	–17 17	–14 14	–14 14	–7 7	–2 2	111	-111	111
0	4-6	2	18	28	20	23	3	12	4	1	116	0	0
1	6-8	–	6 6	13 13	17 17	21 21	12 12	1 1	2 2	–	72	72	72
2	8-10	–	12 6	12 6	14 7	4 2	6 3	2 1	–	–	25	50	100
3	10-12	6 2	9 3	13 11	13 6	12 4	–	18 6	–	–	32	96	288
4	12-14	–	4 1	4 1	20 5	4 1	–	4 1	–	–	9	36	144
5	14-16	10 2	20 4	25 5	15 3	10 2	5 1	5 1	–	–	18	90	450
m_x		6	48	94	87	77	43	38	14	5	412	175	1281
$m_{xy} y'$		16	39	54	48	20	-1	12	-7	-6	175	–	–

$\bar{y}'_x$	2,67	0,81	0,57	0,35	0,26	-0,023	0,32	-0,5	-1,2	3257	—	—
$\bar{y}_x$	10,34	6,62	6,14	6,1	5,52	4,95	5,64	4	2,6	51,91	—	—
$m_x x'$	-12	-48	0	87	154	129	152	70	30	562	—	—
$m_x x'^2$	24	48	0	87	308	387	608	350	180	1992	—	—
$m_{xy} y' x'$	-32	-39	0	48	40	-3	48	-35	-36	9	—	—

Таблиця 3.7

Кореляція між розміром зерна фериту і числом включень графіту

y'	x'	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	Всього		
	$N_{\text{гп}}$ $\Phi(\text{МКМ})$	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	m_y	$m_y y'$	$m_y \cdot y^2$
-3	25-30	—	—3 1	—27 9	—30 10	—9 3	—15 5	—6 2	—	—	30	-90	270
-2	30-35	—4 2	—24 12	—70 35	—30 15	—66 33	—22 11	—20 10	—24 12	—	130	-260	520

-1	35-40	—	—	⁻² 2	⁻⁴ 4	⁻³ 3	—	⁻² 2	—	—	11	-11	11
0	40-45	4	19	34	35	23	26	21	2	3	167	167	167
1	45-50	—	¹ 1	² 2	¹ 1	—	—	—	—	—	4	4	4
2	50-55	—	⁶ 3	¹⁸ 9	¹⁶ 8	²⁸ 14	⁴ 2	¹² 6	⁶ 3	⁴ 2	47	94	188
3	60-65	—	¹² 3	⁸ 2	²⁴ 6	⁸ 2	⁴ 1	⁸ 2	—	—	16	64	256
m_x		6	39	91	80	79	45	43	17	5	405	-199	1249
$m_{xy}y'$		-4	-8	-73	-22	-41	-29	-8	-18	4	-199	—	—
$\bar{y}'_x$		-0,67	-0,205	-0,802	-0,28	-0,52	-0,64	-0,19	-1,06	0,8	3,56	—	—
$\bar{y}_x$		39,15	41,48	38,49	41,40	39,9	39,3	41,55	37,2	46,5	783,5	—	—
$m_x x'$		-12	-39	0	80	158	135	172	85	30	609	—	—
$m_x x'^2$		24	39	0	80	316	405	688	425	180	2157	—	—
$m_{xy}y'x'$		8	8	0	-22	-82	-87	-32	-90	24	-273	—	—

Для одержання рівняння теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти:

$$a' = -0,5231; b' = 0,02112.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\Phi = 39,52 + 0,0106N_{\text{гр.}}$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,02194.$$

Перевіряємо наявність кореляції між числом включень графіту і розміром зерна фериту за допомогою t -критерію Стьюдента

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,02194}{\sqrt{1 - 0,02194^2}} \cdot \sqrt{403} = 0,44.$$

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

За t -критерієм Фішера за виразом (2.23) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо $F_{\text{р.}} = 0,87 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то рівняння регресії адекватне.

Для підтвердження гіпотези про наявність кореляції між вмістом перліту і розміром графітних включень були побудовані кореляційна табл. 3.8 та емпірична лінія регресії (рис. 4.7).

Для визначення теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти:

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

Рівняння теоретичної лінії регресії:

$$D_{\text{гр}} = 61,54 + 0,099П\%.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1769.$$

Перевірка кореляції за допомогою t -критерію Стюдента підтверджує наявність кореляції між розміром графітних включень і вмістом перліту:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1769}{\sqrt{1 - 0,1769^2}} \cdot \sqrt{402} = 3,6.$$

З рис. 4.8 видно, що емпірична лінія регресії має вигляд більш близький до параболічної залежності, ніж до прямолінійної.

За t -критерієм Фішера за виразом (2.23) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо $F_{\text{р}} = 1,35 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то рівняння регресії адекватне.

Для перевірки гіпотези про параболічну залежність розміру графітних включень від вмісту перліту будуюмо 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	30-45	$\begin{matrix} -68 \\ 34 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -50 \\ 25 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -16 \\ 8 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -4 \\ 2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -4 \\ 2 \end{matrix}$	71	-142	284
-1	45-60	$\begin{matrix} -14 \\ 14 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -24 \\ 24 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -13 \\ 13 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -3 \\ 3 \end{matrix}$	$\begin{matrix} -4 \\ 4 \end{matrix}$	58	-58	55
0	60-75	19	55	51	19	12	152	152	152
1	75-90	$\begin{matrix} 5 \\ 5 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 28 \\ 28 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 8 \\ 8 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 6 \\ 6 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 4 \\ 4 \end{matrix}$	51	51	51
2	90-105	$\begin{matrix} 22 \\ 11 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 58 \\ 29 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 32 \\ 16 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 10 \\ 5 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 10 \\ 5 \end{matrix}$	66	132	264
3	120-135	$\begin{matrix} 4 \\ 1 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 8 \\ 2 \end{matrix}$	$\begin{matrix} 12 \\ 3 \end{matrix}$	–	–	6	24	96
m_x		84	163	99	31	27	404	7	753
$m_{xy} y'$		-51	20	23	9	6	7	–	–
$\bar{y}'_x$		-0,607	0,123	0,232	0,290	0,222	0,26	–	–
$\bar{y}_x$		58,39	69,34	70,98	71,85	70,83	341,39	–	–
$m_x x'$		-84	0	99	62	81	158	–	–

$m_x x'^2$	51	0	23	18	18	110	–	–
$x'^2 m_{xy} y'$	-51	0	23	36	54	62	–	–
$m_x x'^3$	-84	0	99	248	729	992	–	–
$m_x x'^4$	84	0	99	496	2187	2866	–	–
$(\bar{y}'_x - \bar{y}')^2 m_x$	25,79	0,02771	30,9276	3,6487	2,8458	63,2399	–	–

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

$$a' = 0,0306; b' = 0,4333; c' = -0,1342.$$

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

$$D_{\text{гр}} = 53,68 + 4,18\text{П}\% - 0,22(\text{П}\%)^2.$$

Кореляційне відношення дорівнює:

$$\eta_r = \sqrt{\frac{\frac{63,2398}{404}}{\frac{753}{404} - \left(\frac{7}{404}\right)^2}} = 0,2899.$$

Оскільки розраховане кореляційне відношення виявилось більше коефіцієнта кореляції, то гіпотеза про криволінійну залежність розміру графітних включень від вмісту перлиту підтверджується.

З рис. 4.8 видно, що при вмісті перлиту до 10% зі зростанням кількості перлиту розмір графітних включень збільшується, а при вмісті перлиту більше 10% збільшення його вмісту не веде до суттєвої зміни розміру графітних включень.

Для підтвердження гіпотези про наявність кореляції між вмістом перлиту і розміром феритного зерна була побудована кореляційна табл. 3.9 і знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.9).

Для одержання рівняння теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти:

$$a' = -0,3065; b' = 0,04207.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\Phi = 41,3 + 0,14\text{П}\%.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює

$$r=0,04982.$$

Перевіряємо наявність кореляції між кількістю перліту і розміром феритного зерна.

Розрахункове значення t -критерію Стюдента дорівнює: [16-21].

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,04982}{\sqrt{1 - 0,04982^2}} \cdot \sqrt{401} = 0,98; \quad t_{\text{табл}} = 1,96.$$

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

За t -критерієм Фішера за виразом (2.23) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо $F_{\text{р.}} = 1,25 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то рівняння регресії адекватне.

Для підтвердження гіпотези про наявність кореляції між розміром феритного зерна і розміром графітних включень була побудована кореляційна табл. 3.10 та знайдена 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		
	$\begin{matrix} П\% \\ \Phi, \text{ мкм} \end{matrix}$	0-3	3-6	6-9	9-12	12-15	m_y	$m_{y \cdot y'}$	$m_{y \cdot y'^2}$
-2	20-30	-8 4	-30 15	-16 8	-4 2	—	29	-58	116
-1	30-40	-34 34	-59 59	-30 30	-7 7	-11 11	141	-141	141
0	40-50	30	71	37	20	10	168	168	168
1	50-60	11 11	14 14	18 18	2 2	3 3	48	48	48
2	60-70	6 3	16 8	6 3	4 2	2 1	17	34	68
m_x		82	167	96	33	25	403	-117	373
$m_{xy}y'$		-25	-59	-22	-5	-6	-117	—	—
$\bar{y}'_x$		-0,304	-0,353	-0,229	-0,151	-0,24	-1,27	—	—
$\bar{y}_x$		41,96	41,47	42,71	43,49	42,60	212,2	—	—
$m_x x'$		-82	0	96	66	75	155	—	—
$m_x x'^2$		82	0	96	132	225	535	—	—
$x' m_{xy} y'$		25	0	-22	-10	-18	-25	—	—

Таблиця 3.10

Кореляція між розмірами феритних зерен
і розмірами графітних включень

y'	x'	-1	0	1	2	3	Всього		
	Φ , мкм $D_{гр}$, мкм	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	m_y	$m_{y'y'}$	$m_{y'^2}$
-2	30-45	-12 6	-74 37	-52 26	-8 4	-4 2	75	-150	300
-1	45-60	-3 3	-29 29	-15 15	-11 11	—	58	-58	58
0	60-75	14	45	65	20	5	149	149	149
1	75-90	5 5	15 15	22 22	6 6	5 5	53	53	53
2	90-105	4 2	34 17	72 36	20 10	8 4	69	138	27
3	105-120	—	3 1	—	—	—	1	3	9
4	120-135	—	-16 4	4 1	—	—	5	20	80
m_x		30	148	165	51	16	410	6	776
$m_{xy'y'}$		-6	-35	31	7	9	6	—	—
$\bar{y}'_x$		-0,2	-0,236	0,187	0,137	0,562	0,45	—	—
$\bar{y}_x$		64,5	63,96	70,30	69,56	75,93	344	—	—
$m_x x'$		-60	-148	0	51	32	-125	—	—
$m_x x'^2$		120	148	0	-51	64	383	—	—
$m_{xy'y'x'}$		12	35	0	7	18	72	—	—

Для одержання рівняння теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти:

$$a' = -0,3065; b' = 0,04207.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$D_{\text{гр}} = 54,24 + 0,32\Phi.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r=0,1427.$$

Розрахунковий t -критерій Стюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1427}{\sqrt{1-0,1427^2}} \cdot \sqrt{410} = 2,92.$$

Оскільки $t_{\text{табл}} > t_{\text{роз}} = 1,96$, тоді між розміром зерна фериту і розміром графітних включень існує кореляційний зв'язок.

За t -критерієм Фішера за виразом (2.23) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо $F_{\text{р}} = 1,46 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то рівняння регресії адекватне.

Одержимо рівняння множинної кореляції між твердістю, числом графітних включень, їх розмірами і вмістом перліту – факторами, які найбільше впливають на твердість.

Позначимо: $\text{НВ} = x_1$; $D_{\text{гр}} = x_2$; $\text{П}\% = x_4$; $\text{N}_{\text{гр}} = x_5$, тоді рівняння множинної кореляції в натуральному масштабі має вигляд:

$$x_1 = a + bx_2 + cx_4 + dx_5,$$

а в стандартному масштабі його вигляд буде наступним:

$$\bar{t}_1 = \beta_2 t_2 + \beta_4 t_4 + \beta_5 t_5.$$

Коефіцієнти рівняння визначаються із системи рівнянь [20, 21].

$$\begin{cases} r_{12} = \beta_2 + \beta_4 r_{42} + \beta_5 r_{52} \\ r_{14} = \beta_2 r_{24} + \beta_4 + \beta_5 r_{54} \\ r_{15} = \beta_2 r_{25} + \beta_4 r_{45} + \beta_5. \end{cases}$$

Коефіцієнти кореляції, які підставляються в систему рівнянь для визначення коефіцієнтів рівняння множинного зв'язку зведені в табл. 3.11.

Таблиця 3.11

Лінійні коефіцієнти кореляції залежностей між різними показниками структури феритного ковкого чавуну

Показники структури	$x_4 = \text{П}\%$	$x_3 = \Phi$	$x_5 = N_{\text{гр}}$	$x_2 = D_{\text{гр}}$
$x_4 = \text{П}\%$	–	0,04982	<u>-0,1889</u>	<u>0,1769</u>
$x_3 = \Phi$	0,04982	–	0,02194	<u>0,1427</u>
$x_5 = N_{\text{гр}}$	<u>-0,1889</u>	0,02194	–	<u>-0,2998</u>
$x_2 = D_{\text{гр}}$	<u>0,1769</u>	<u>0,1427</u>	<u>-0,2998</u>	–

Примітка: Коефіцієнти кореляції достовірних залежностей підкреслені

Підставивши в систему рівнянь значення коефіцієнтів кореляції, що взяті з табл. 3.11, одержимо:

$$\begin{cases} 0,1199 = \beta_2 + 0,1769\beta_4 - 0,2998\beta_5 \\ 0,3002 = 0,1769\beta_2 + \beta_4 - 0,1889\beta_5 \\ -0,24629 = -0,2998\beta_2 - 0,1889\beta_4 + \beta_5. \end{cases}$$

Вирішивши цю систему рівнянь, одержимо:

$$\beta_2 = 0,0161143; \quad \beta_4 = 0,2610529; \quad \beta_5 = -0,192146.$$

Для визначення коефіцієнтів регресії в натуральному масштабі визначимо дисперсії і середнє значення результативної і факторної ознаки: [20, 21].

з табл. 3.1

$$\sigma_1^2 = \left[\frac{1073}{309} - \left(\frac{379}{309} \right)^2 \right] \cdot 49 = 96,48;$$

$$\sigma_1 = 9,822; \quad \bar{x}_1 = \frac{379}{309} \cdot 7 + 124,5 = 133,0857;$$

з табл. 3.3

$$\sigma_4^2 = \left[\frac{412}{294} - \left(\frac{142}{294} \right)^2 \right] \cdot 9 = 10,521;$$

$$\sigma_4 = 3,243; \quad \bar{x}_4 = \frac{142}{294} \cdot 3 + 4,5 = 5,9489;$$

з табл. 3.5

$$\sigma_2^2 = \left[\frac{803}{420} - \left(\frac{7}{420} \right)^2 \right] \cdot 225 = 429,75;$$

$$\sigma_2 = 20,73; \quad \bar{x}_2 = \frac{7}{420} \cdot 15 + 67,5 = 67,7499;$$

з табл. 3.4

$$\sigma_3^2 = \left[\frac{1063}{333} - \left(\frac{167}{333} \right)^2 \right] \cdot 25 = 73,475;$$

$$\sigma_3 = 8,5715; \quad \bar{x}_3 = \frac{-167}{333} \cdot 5 + 42,5 = 39,993;$$

з табл. 3.1

$$\sigma_5^2 = \left[\frac{1023}{309} - \left(\frac{112}{309} \right)^2 \right] \cdot 100 = 317,9;$$

$$\sigma_5 = 17,83; \quad \bar{x}_5 = \frac{112}{309} \cdot 10 + 45 = 48,624.$$

Розраховуємо коефіцієнти рівняння множинної кореляції:

$$b = \frac{\sigma_1}{\sigma_{x_2}} \cdot \beta_2 = \frac{9,822}{20,73} \cdot 0,0161143 = 0,00766;$$

$$c = \frac{\sigma_1}{\sigma_{x_4}} = \frac{9,822}{3,243} \cdot 0,2610529 = 0,787;$$

$$d = \frac{\sigma_1}{\sigma_{x_5}} = -\frac{9,822}{17,83} \cdot 0,192146 = -0,106;$$

$$a = 133,0857 - 67,7499 \cdot 0,00766 - 5,9489 \cdot 0,787 + 0,106 \cdot 48,624 = 133,56.$$

Рівняння множинної кореляції має вигляд:

$$HB = 133,56 + 0,00766D_{\text{гр}} + 0,787\P\% - 0,106N_{\text{гр}}.$$

Розраховуємо коефіцієнти множинної кореляції:

$$\begin{aligned} R &= \sqrt{\beta_2 r_{12} + \beta_4 r_{14} + \beta_5 r_{15}} = \\ &= \sqrt{0,0161143 \cdot 0,1199 + 0,2610529 \cdot 0,3009 + 0,192146 \cdot 0,24629} = \\ &= 0,35715. \end{aligned}$$

Коефіцієнти детермінації:

$$D = R^2 = 0,127623.$$

З рівняння множинної кореляції слідує, що найбільший вплив на твердість феритного ковкого чавуну має кількість перліту. При збільшенні кількості перліту на 1% твердість чавуну збільшується на 0,8 одиниць за Брінелем. Суттєвий вплив на твердість має число графітних включень, зі збільшенням яких твердість феритного ковкого чавуну знижується.

Коефіцієнт детермінації D свідчить, що на 12,8% зміна твердості феритного ковкого чавуну обумовлена вмістом перліту, числом і розміром графітних включень та 87,2% припадає на долю інших, неврахованих факторів.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

При дослідженні впливу структури ковкого чавуну на механічні властивості доцільно також використовувати пакет програми MathCAD та інші [22, 23, 24].

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

Математичні розрахунки для побудови графіків залежностей $y = f(x)$ виконували в середовищі пакету MathCAD і графічних редакторів Microsoft Office.

Залежності твердості ковкого чавуну від структури, приведені на рис. 4.1–4.10.

4.1. Вплив кількості виділень графіту на твердість ковкого чавуну

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

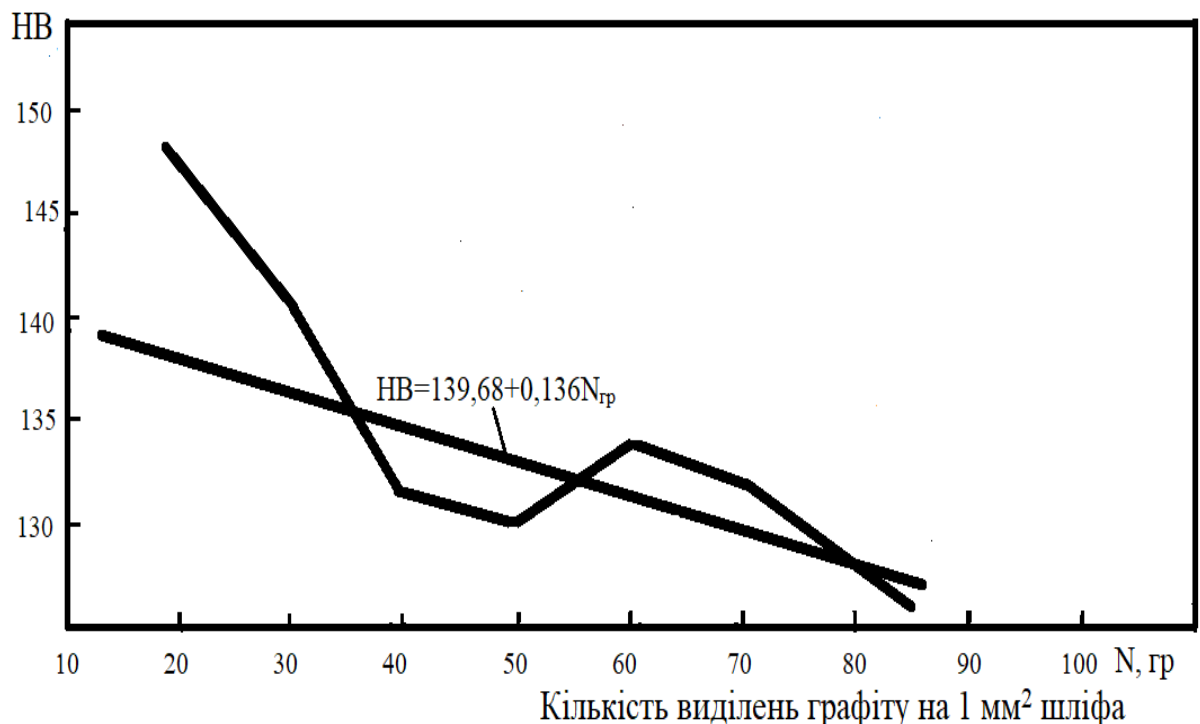


Рисунок 4.1 – Залежність числа включень графіту на 1 мм^2 поверхні шліфа на твердість феритного ковкого чавуну

З рис. 4.1. слідує, що в межах досліджуваної вибірки твердість ковкого чавуну знижується зі збільшенням числа графітних включень на 1 мм^2 , про що також свідчить високе значення коефіцієнта кореляції $r = 0,2463$. Залежність між цими факторами прямолінійна.

4.2. Вплив діаметра графітних включень ковкого чавуну

на твердість $HB = f(D_{\text{гр}})$;

Залежності твердості ковкого чавуну від діаметра графітних включень наведено на рис. 4.1. Перевірка коефіцієнта кореляції за допомогою критерія Стюдента показує на відсутність кореляції між цими ознаками. Отже, діаметр графітних включень не надає суттєвого впливу на твердість ковкого чавуну.

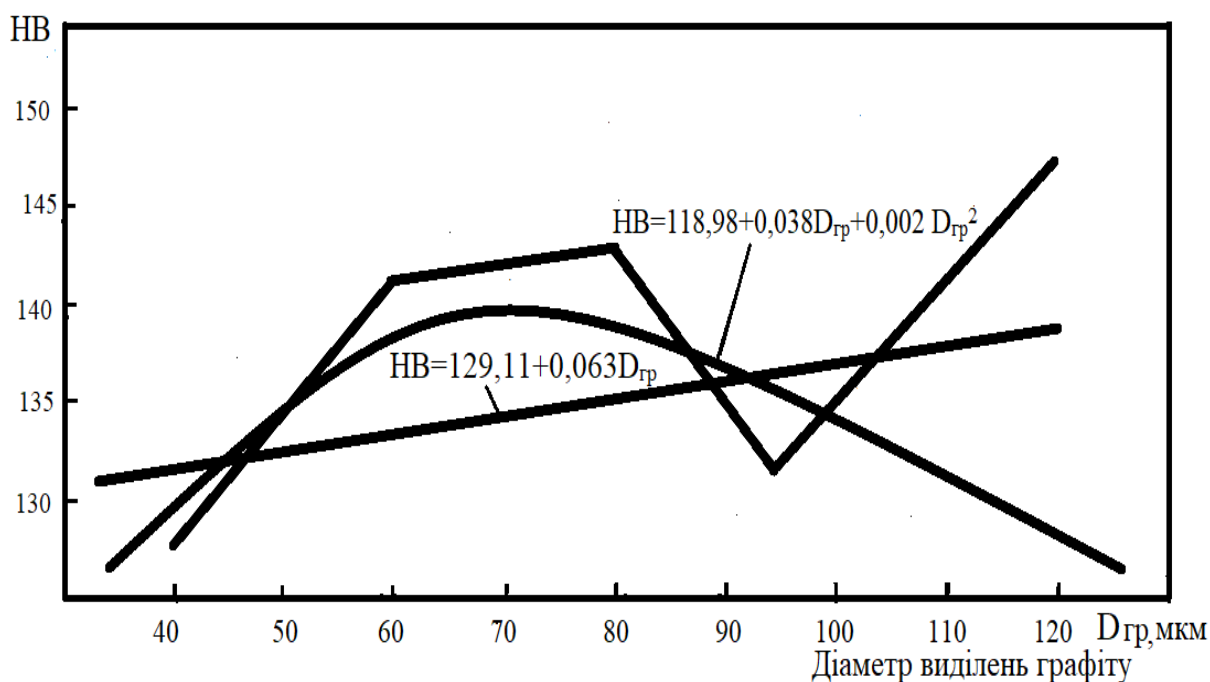


Рисунок 4.2 – Залежність діаметра виділень графіту на твердість феритного ковкого чавуну

З рис. 4.2 видно, що при розмірі графітних включень менше 80 мкм зі збільшенням розмірів графітних включень збільшується твердість. При збільшенні розміру графітних включень понад 80 мкм твердість починає знижуватися. Пояснити це можна так, що при розмірі графітних включень

менше 80 мкм на твердість переважний вплив чинить число графітних включень.

При збільшенні розмірів графітних включень понад 80 мкм, вони починають суттєво впливати на твердість, збільшуючи пористість металевої матриці.

4.3. Вплив вмісту перліта на твердість ковкого чавуну $HB = f(P\%)$

Залежність твердості ковкого чавуну від вмісту перліта наведено на рис. 4.3.

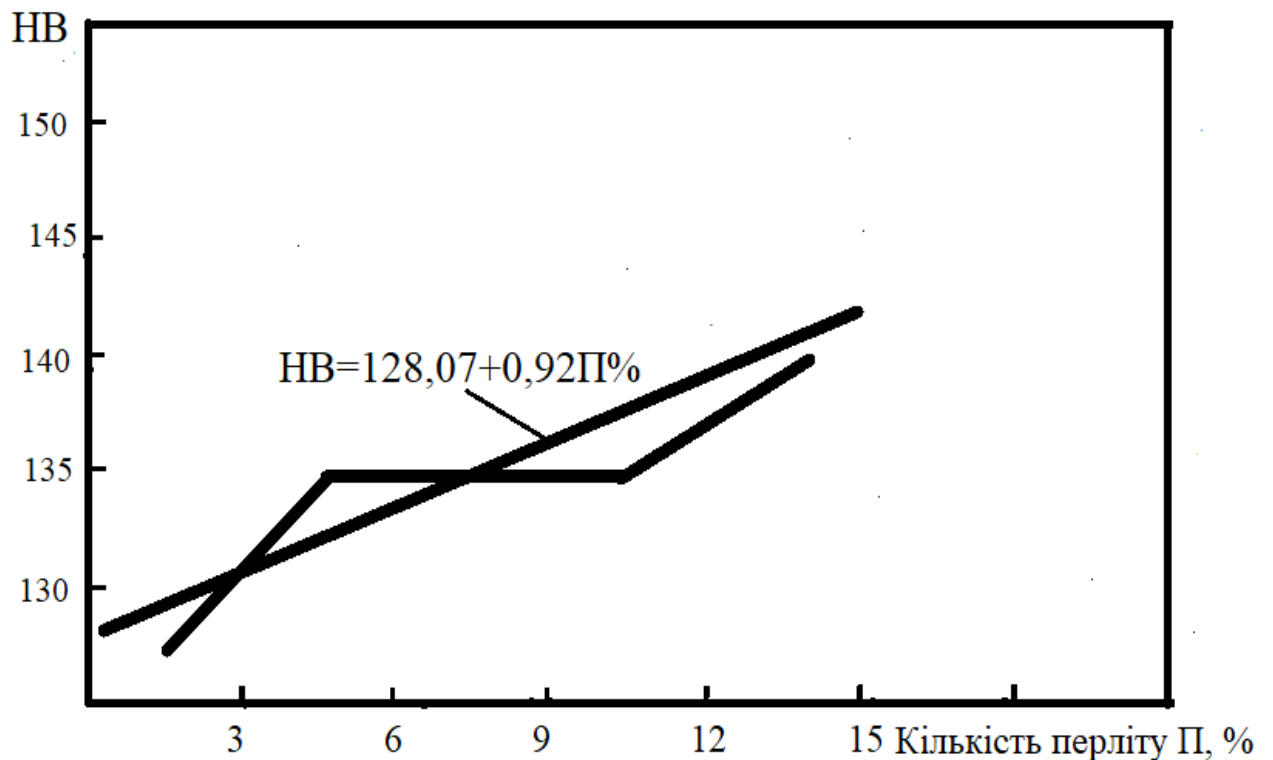


Рисунок 4.3 – Залежність вмісту перліта на твердість феритного ковкого чавуну

З рис. 4.3 видно, що в межах досліджуваної вибірки твердість ковкого чавуну підвищується із збільшенням вмісту перліту.

4.4. Вплив розміру феритного зерна на твердість ковкого чавуну

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

Залежність твердості ковкого чавуну від розміру феритного зерна наведено на рис. 4.4.

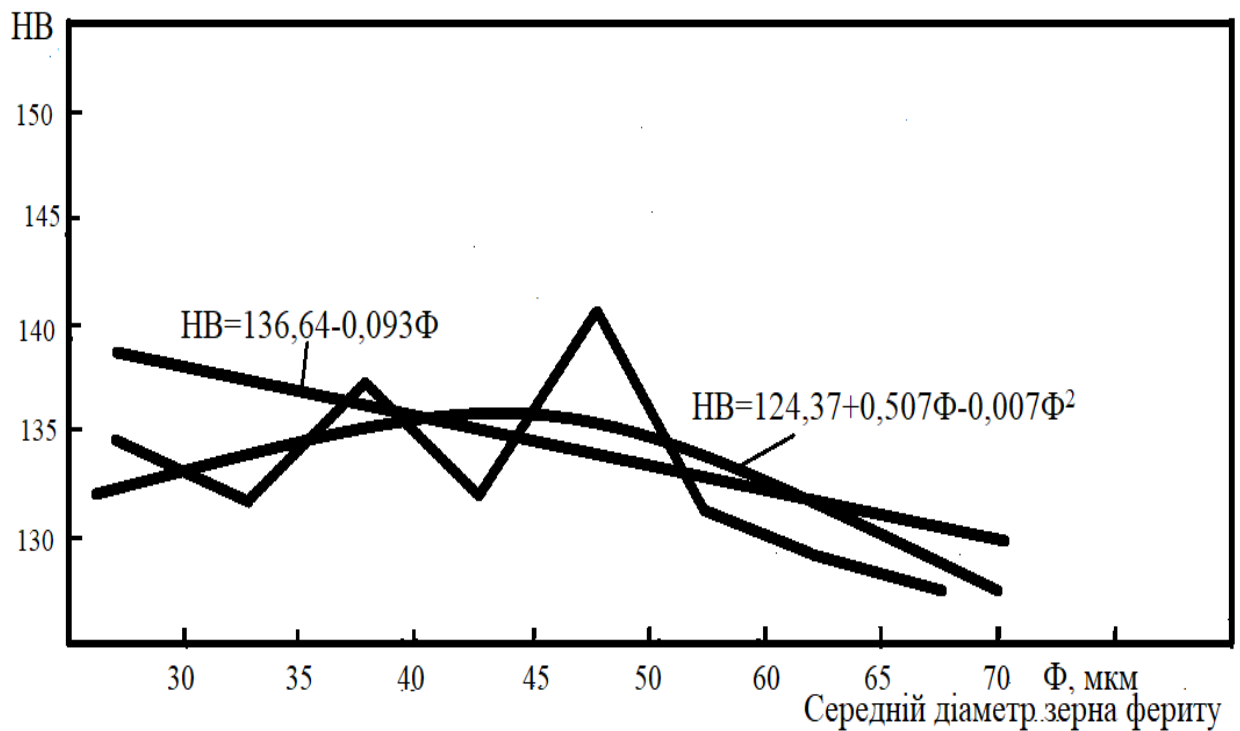


Рисунок 4.4 – Залежність розміру феритного зерна на твердість ковкого чавуну

З рис. 4.4 видно, що зміна розмірів феритного зерна в інтервалі від 25 до 40 мкм суттєвого впливу на твердість не надає. Коли розмір феритного зерна більше 40 мкм, то зі збільшенням розмірів зерна твердість феритного ковкого чавуну буде помітно знижуватися.

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

Залежність діаметра графітних включень ковкого чавуну від їх числа наведено на рис. 4.5.

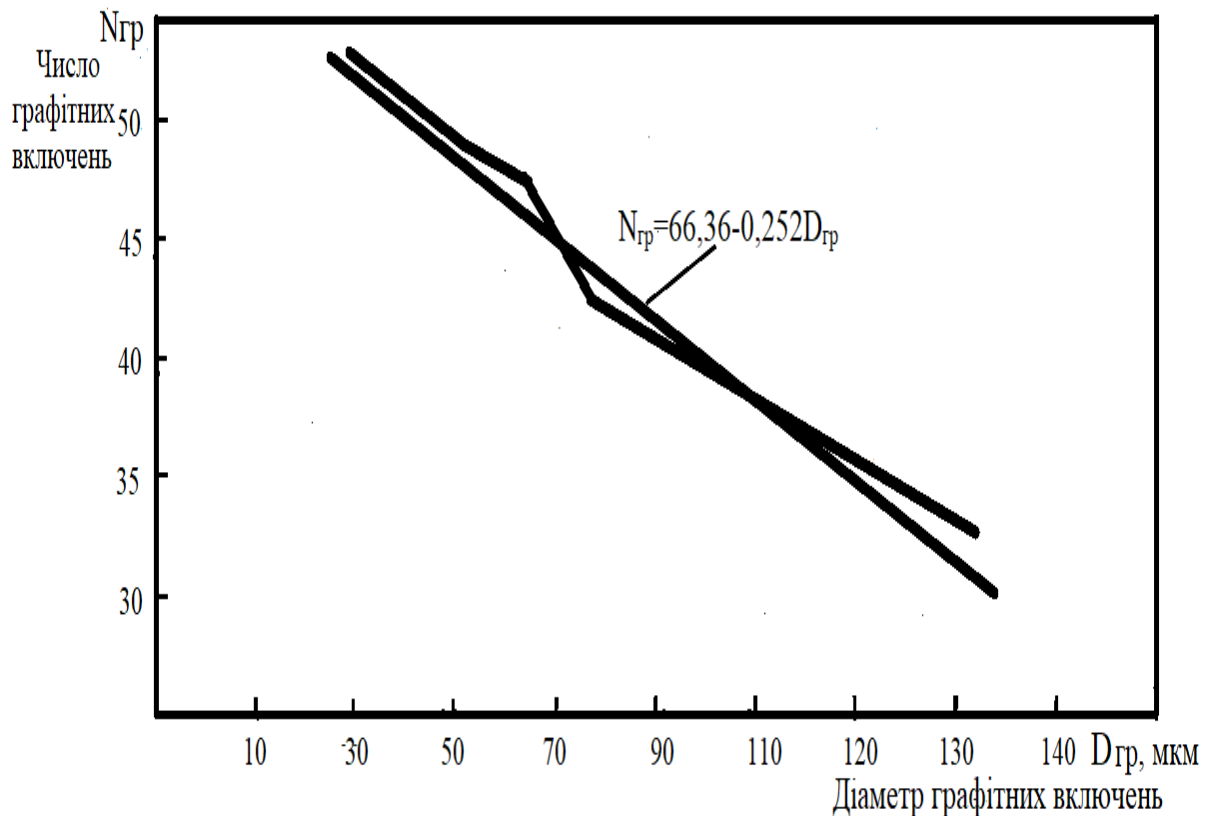


Рисунок 4.5 – Залежність діаметра графітних включень від їх числа, що припадає на 1 м² шліфу

З рис. 4.5 видно, що між числом і розміром графітних включень існує тісний кореляційний зв'язок. Наявність тісної кореляції підтверджує і високе значення коефіцієнт кореляції ($r = -0,2998$). Отже, пропорційно зі зростанням числа графітних включень зменшується їх розмір.

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

Залежність кількості включень графіту у феритному ковкому чавуні від вмісту перліту наведено на рис. 4.6.

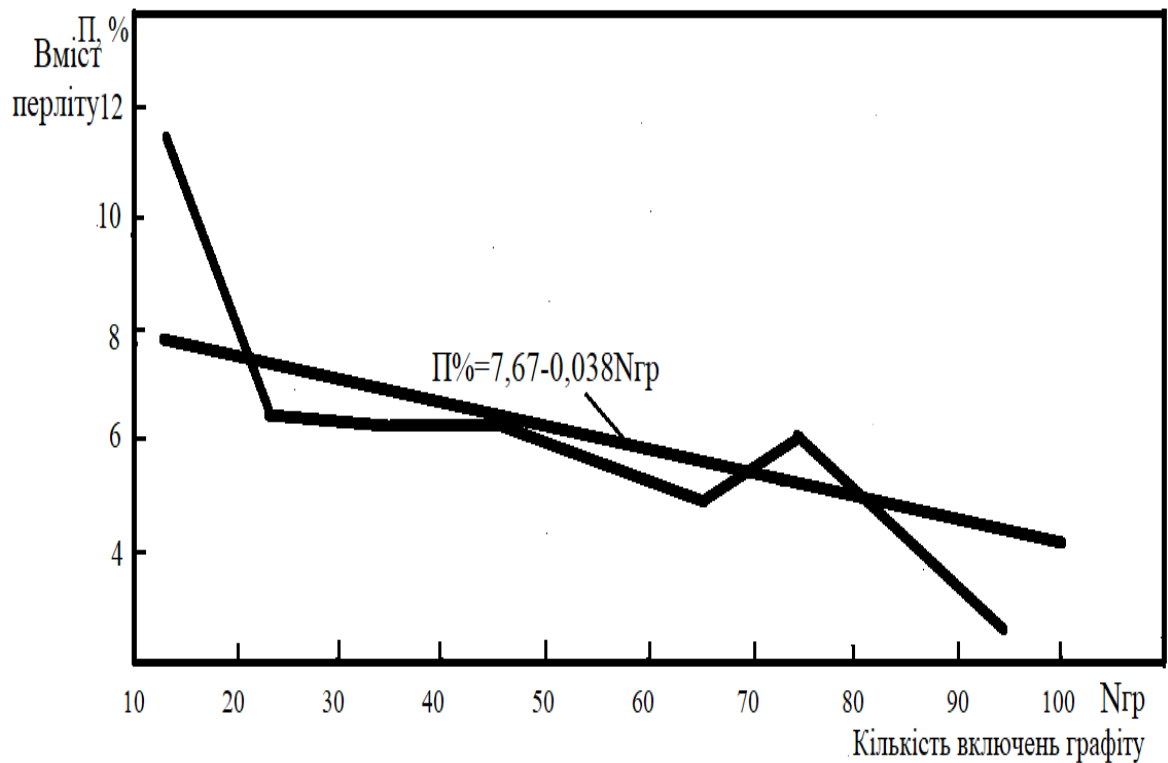


Рисунок 4.6 – Вплив кількості включень графіту на вміст перліту
у феритному ковкому чавуні

З рис. 4.6 видно, що зі зростанням числа графітних включень вміст перліту знижується.

4.7. Вплив числа включень графіту на розмір зерна фериту

$$\Phi = f(N_{gr})$$

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

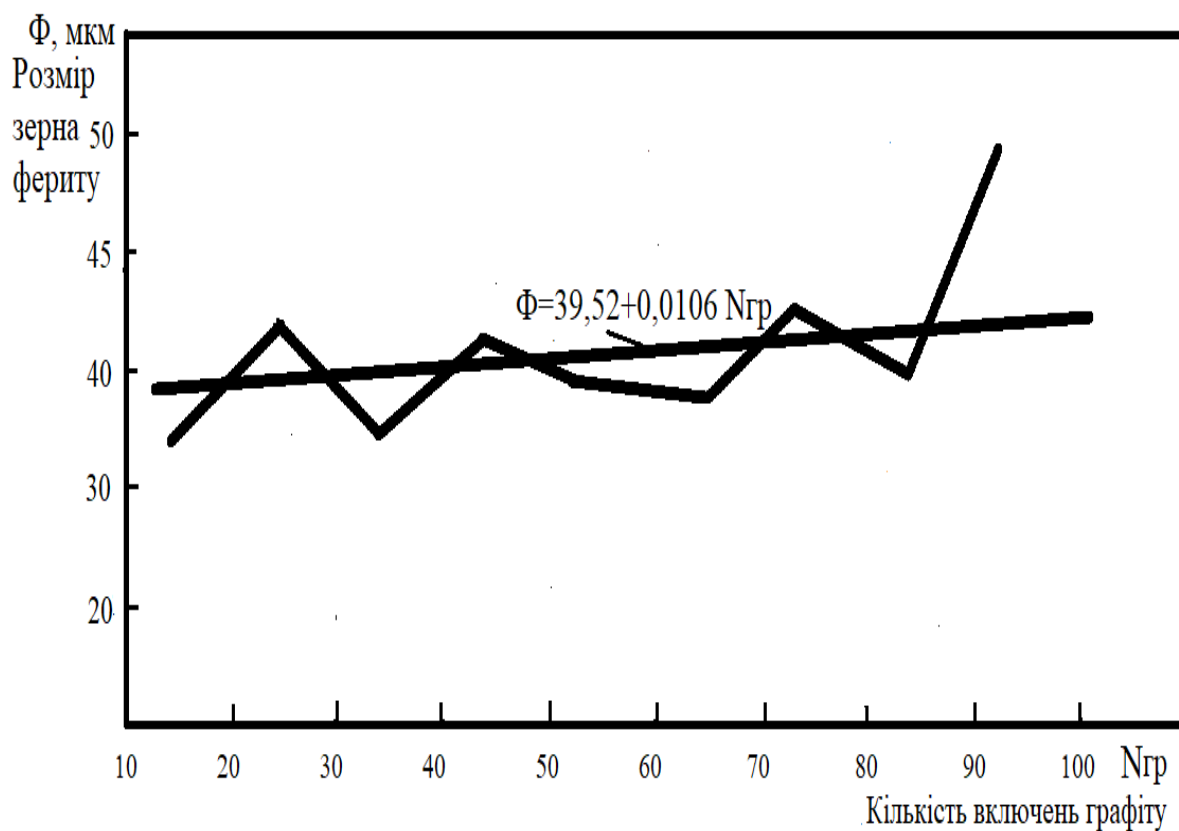


Рисунок 4.7 – Вплив числа включень графіту на розмір зерна фериту

4.8. Вплив вмісту перліту на середній діаметр графітних включень

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

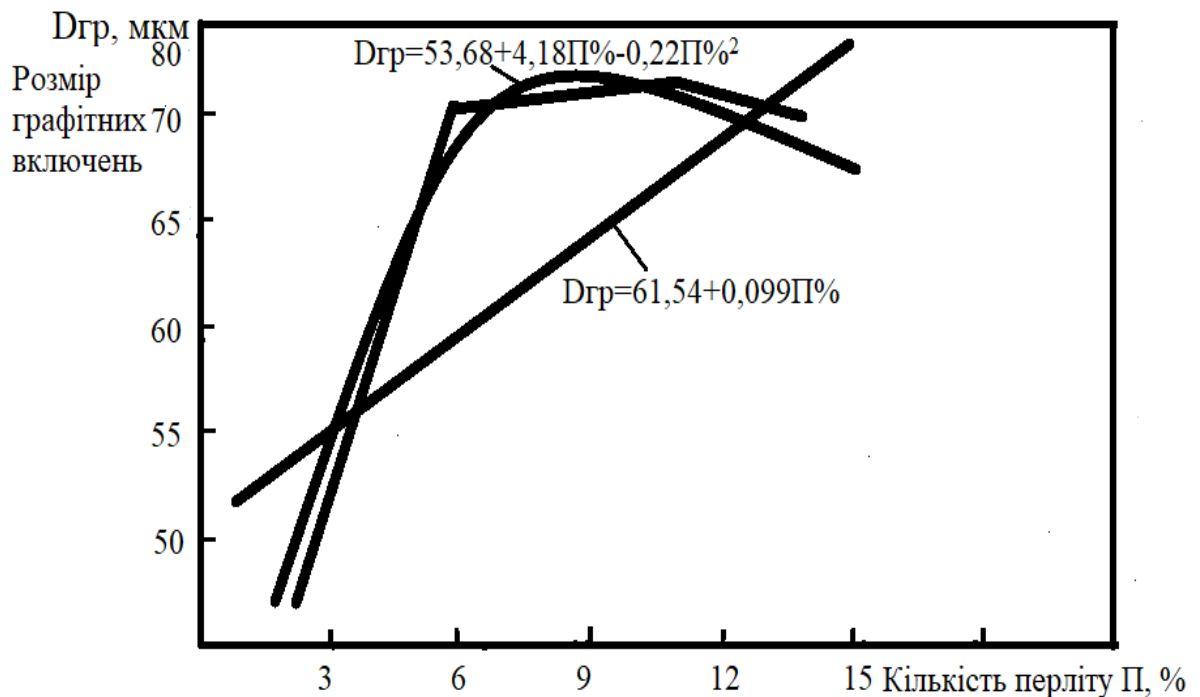


Рисунок 4.8 – Вплив вмісту перліту на середній діаметр графітних включень

З рис. 4.8 видно, що при вмісті перліту до 10% зі зростанням кількості перліту розмір графітних включень збільшується, а при вмісті перліту більше 10% збільшення його вмісту не веде до суттєвої зміни розміру графітних включень.

З рис. 4.8 видно, що емпірична лінія регресії має вигляд більш близький до параболічної залежності, ніж до прямолінійної.

4.9. Вплив вмісту перліту на розмір феритного зерна ковкого чавуну

$$\Phi = f(P)$$

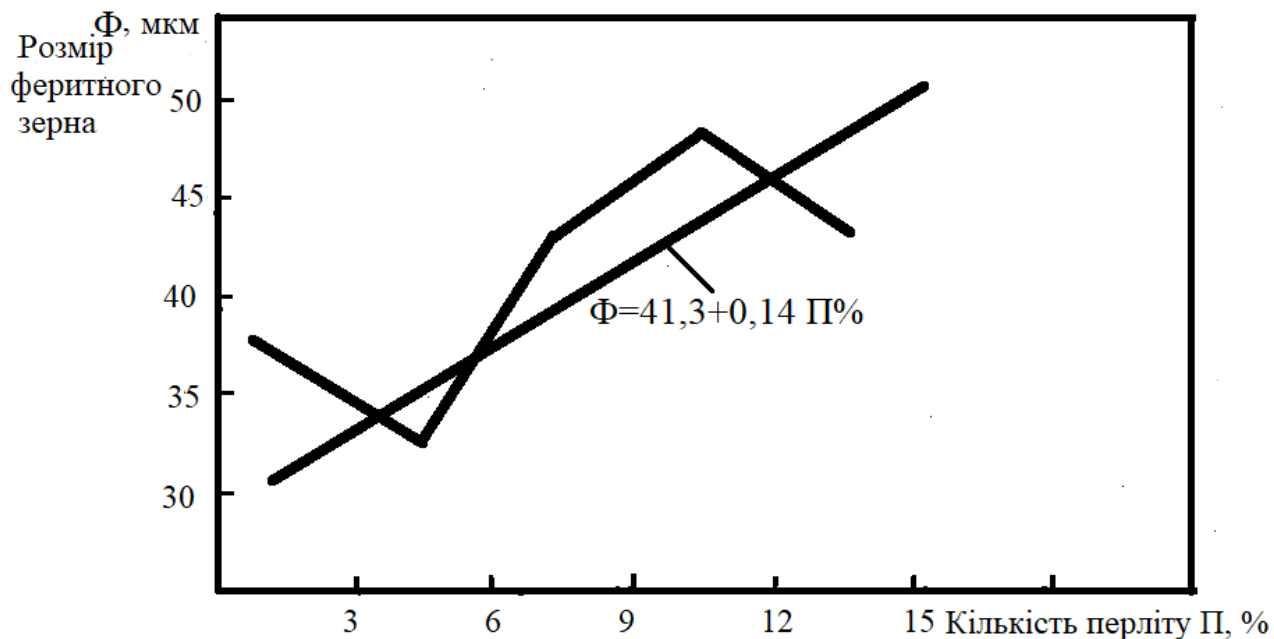


Рисунок 4.9 – Вплив вмісту перліту на розмір феритного зерна ковкого чавуну

4.10. Вплив розміру феритного зерна на діаметр виділень графіту

$$D_{gp} = f(\Phi)$$

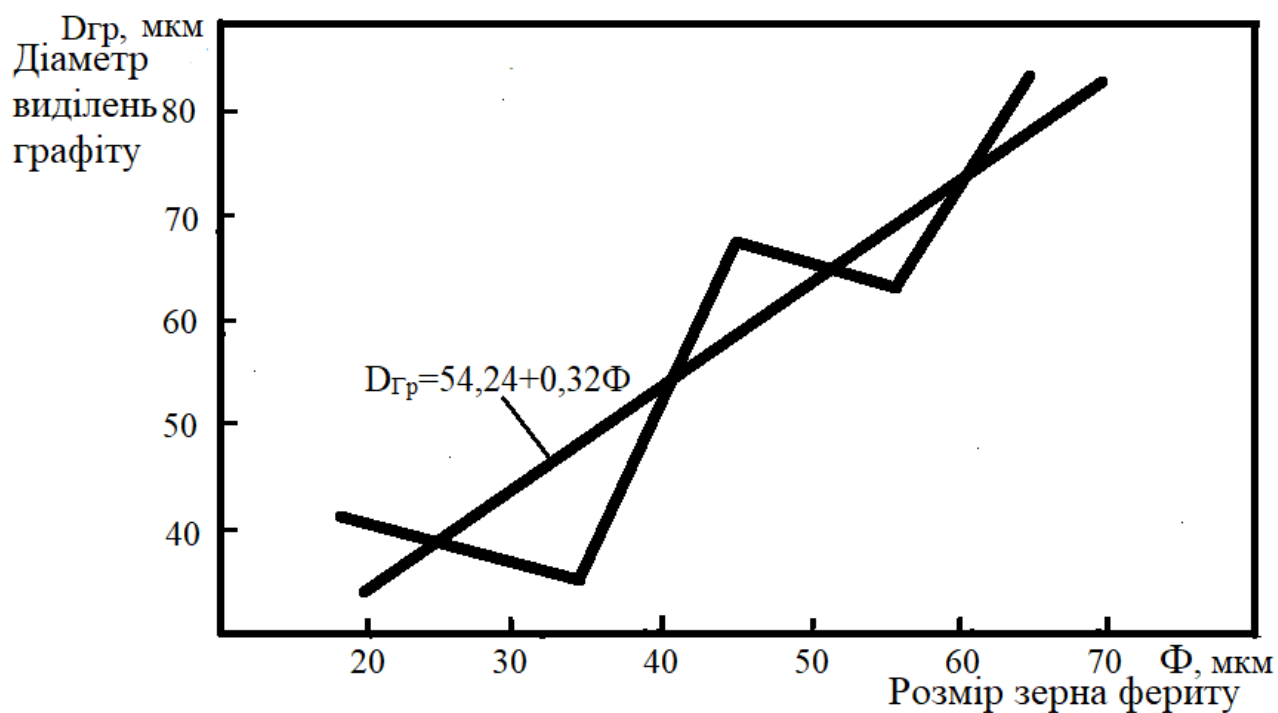


Рисунок 4.10 – Вплив розміру феритного зерна на діаметр виділень графіту феритного ковкого чавуну

З рис. 4.10 видно, що в межах досліджуваної вибірки діаметр виділень графіту збільшується зі збільшенням розміру феритного зерна феритного ковкого чавуну.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі виконані дослідження впливу структури на твердість ковкого чавуну. Проведені дослідження показали наступне, що структура ковкого чавуну має істотний вплив на твердість.

З'ясовано, що при збільшенні розміру графітних включень до 80 мкм збільшується твердість ковкого чавуну, а якщо графітні включення будуть більше 80 мкм твердість починає знижуватися. При дослідженні твердість ковкого чавуну знижується зі збільшенням числа графітних включень та підвищується зі збільшенням вмісту перліту, а також знижується зі збільшенням розміру феритного зерна більше 40 мкм.

Показано також, що твердість ковкого чавуну зі збільшенням числа графітних включень знижується за рахунок збільшення мікропористості металевої матриці.

При дослідженні встановлено, що в межах досліджуваної вибірки твердість ковкого чавуну підвищується зі збільшенням вмісту перліту. Зі зростанням числа графітних включень вміст перліту знижується.

Для підвищення механічних властивостей ковкого чавуну на основі проведених досліджень пропонуємо наступне: за критерій оцінки чавуну приймаємо наступне – зі збільшенням вмісту перліту твердість ковкого чавуну підвищується.

Для одержання ковкого чавуну з підвищеними механічними властивостями необхідно, щоб вміст вуглецю відповідав 2,5-3,1%, кремнію 0,88-1,25%. Вміст марганцю повинен бути в інтервалі 0,41-0,63%, а сірки 0,02-0,14% згідно ДСТУ EN 1562:2019.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: Навчальний посібник. К: Либідь, 2002. 328с.
2. Клименко В.М., Шиліна О.П, Осадчук А.Ю. Технологія конструкційних матеріалів. Частина перша. Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво. Навчальний посібник. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця. 2005, 97 с.
3. Єременко А.П. Конспект лекцій з дисципліни „Виробництво виливків з чорних металів” розділ «Виробництво виливків з чавуну» для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти зі спеціальності 136 «Металургія». 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. Конспект лекцій з дисципліни «Матеріалознавство» (для студентів 2 курсу денної форми навчання освітнього рівня «бакалавр» спеціальності 185 Нафтогазова інженерія та технології). Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 122 с.

8. Іваненко І. М. Конструкційні матеріали у виробництвах неорганічних речовин [Електронний ресурс] : підручник для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», спеціалізації «Хімічні технології неорганічних речовин та водоочищення». Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 242 с.
9. Хричиков В.Е., Меньяло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. Видання друге, доопрацьоване. Дніпропетровськ: НМетАУ, 2015. 89с.
10. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Сайчук О.В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: Монографія / Під ред. д.т.н. проф. Скобло Т.С. Х: Діса плюс. 2019, 282с.
11. Іванов В.Г., Парахневич Є.М., Шустов С.О. Ливарні сплави та плавка чавунів. Методичний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ. 2020, 62с.
12. Акімов ВІ., Силованюк В.П., Волчков В.П., Івантишин Н.А. Вплив форми графітових включень на механічні властивості залізовуглецевих сплавів. Фізико-хімічна механіка матеріалів. № 5. 2012, С. 61-66.
13. Бялік Г.А., Наумик В.В., Цивірко Е.І. Практикум з теорії ливарних сплавів та процесів. Навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ. 2013, 98с.
14. Бузило В.І., Сердюк Б.П., Яворський А.В., Гайдай О.А. Матеріалознавство. Навчальний посібник. Дніпро. НТУ «ДП». 2021, 243с.
15. Національний стандарт України. ДСТУ EN 1562:2019. Виливки із ковкого чавуну. Загальнотехнічні умови. 2019.
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. №2 (1362). 2011, С.29-36.
17. Перегуда О.В., Капустяк О.А., Курилко О.Б. Статистична обробка даних. Навчальний посібник. Електронне видання. 2022, 103с.
18. Бахрушин В.С. Методи аналізу даних. Навчальний посібник. Запоріжжя: КПУ. 2011, 268с.

19. Руденко В.М. Математична статистика. Навчальний посібник. К. ЦУЛ. 2012, 304с.
20. Василенко О.А., Сенга І.А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях. Навчальний посібник. Одеса: ОНАО ім. О.С. Попова. 2011, 166с.
21. Бухкало С.І., Іглін С.П. Деякі моделі дослідження структурно-хімічних змін при експлуатації полімерних виробів. Інтегровані технології. Х: НТУ «ХП». №3. 2016, С.52-57.
22. Назаренко Н. Можливості математичного пакету MATHCAD. Збірник тез II Української конференції молодих науковців. Київ. 2015, С.181-183.
23. Дзісь В.Г., Левчук О.В., Дячинська О.М. Прикладна математика на основі MathCAD: Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ. 2020, 378с.
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.

ДОДАТКИ