

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 на відносне подовження**  
**ковкого чавуну**

Виконав здобувач вищої освіти  
II курсу, групи ПМ-23М-1  
спеціальності 131  
«Прикладна механіка»  
\_\_\_\_\_ Денис МИРОНОВ  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 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**

**Миронов Денис Сергійович**

1. Тема роботи: Дослідження впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну.

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 відносне подовження 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 БОСИЙ

Завдання прийнято до виконання

«\_\_\_»\_\_\_\_\_20\_\_р.

Підпис здобувача

\_\_\_\_\_ Денис МИРОНОВ

## ЗМІСТ

|                                                                                                                                                                                         | стор |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ВСТУП .....                                                                                                                                                                             | 8    |
| РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ                                                                                                                                                |      |
| ВЛАСТИВОСТЕЙ КОВКОГО ЧАВУНУ .....                                                                                                                                                       | 11   |
| 1.1. Вивчення впливу структури ковкого чавуну на його відносне подовження .....                                                                                                         | 11   |
| 1.2. Вивчення впливу діаметра графітних включень та величини зерна на відносне подовження ковкого чавуну .....                                                                          | 12   |
| 1.3. Вивчення впливу числа виділень графіту на відносне подовження ковкого чавуну .....                                                                                                 | 13   |
| 1.4. Вивчення впливу між різними показниками механічних властивостей ковкого чавуну .....                                                                                               | 13   |
| 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 ковкого чавуну на його відносне подовження .....                                                                               | 15   |
| РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВЛИВУ СТРУКТУРИ                                                                                                                                         |      |
| КОВКОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО ВІДНОСНЕ ПОДОВЖЕННЯ .....                                                                                                                                        | 22   |
| 3.1. Вивчення впливу структури феритного ковкого чавуну на відносне подовження (оброблення даних методом кореляції залежності відносного подовження ковкого чавуну від структури) ..... | 22   |
| 3.1.1. Вплив числа виділень графіту на відносне подовження ковкого чавуну .....                                                                                                         | 22   |
| 3.1.2. Вплив вмісту перліту на відносне подовження феритного ковкого чавуну .....                                                                                                       | 23   |
| 3.1.3. Вплив розміру феритного зерна на відносне подовження ковкого чавуну .....                                                                                                        | 26   |
| 3.1.4. Вплив середнього діаметра графітних включень                                                                                                                                     |      |

|                                                                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| на відносне подовження ковкого чавуну .....                                                                          | 29 |
| 3.1.5. Одержання рівняння множинної кореляції залежності<br>відносного подовження від структури ковкого чавуну ..... | 32 |
| 3.1.6. Вплив між різними показниками механічних властивостей<br>ковкого чавуну .....                                 | 34 |
| 3.1.7. Вплив між межею міцності та відносним подовженням<br>ковкого чавуну .....                                     | 34 |
| 3.1.8. Вплив між відносним подовженням і твердістю ковкого чавуну .....                                              | 37 |
| 3.1.9. Одержання рівнянь множинного зв'язку між різними показниками<br>механічних властивостей ковкого чавуну .....  | 39 |
| 3.1.10. Одержання рівняння множинного зв'язку відносного подовження<br>від міцності і твердості ковкого чавуну ..... | 40 |
| 3.1.11. Номограма для визначення за відомою твердістю значень<br>міцності і пластичності ковкого чавуну .....        | 41 |
| РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ .....                                                                       | 42 |
| 4.1. Залежність числа виділень графіту на відносне подовження<br>ковкого чавуну .....                                | 42 |
| 4.2. Залежність розміру зерна фериту на відносне подовження<br>ковкого чавуну .....                                  | 43 |
| 4.3. Вплив вмісту перліту на відносне подовження ковкого чавуну .....                                                | 44 |
| 4.4. Залежність середнього діаметра графітних включень на відносне<br>подовження ковкого чавуну .....                | 45 |
| 4.5. Залежність межі міцності ковкого чавуну від відносного подовження .....                                         | 46 |
| 4.6. Залежність між відносним подовженням ковкого чавуну і твердістю .....                                           | 47 |
| 4.7. Побудова номограми для визначення за відомою твердістю значень<br>міцності і пластичності ковкого чавуну .....  | 48 |
| ВИСНОВКИ .....                                                                                                       | 49 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....                                                                                     | 50 |
| ДОДАТКИ .....                                                                                                        | 53 |
| Додаток 1. Довідка про публікацію .....                                                                              | 54 |

## АНОТАЦІЯ

Миронов Д. С. Дослідження впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну, спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2024. – 54с. Матеріали ілюстрації 10 іл.

Мета дослідження – це вивчення впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну. Дослідження проводились відповідно методами математичної статистики – перевірка кореляційним аналізом в середовищі Microsoft Offis Excel та MathCAD.

В роботі отримані дані з метою встановлення степені достовірності досліджуваних залежностей відносного подовження від показників та структури ковкого чавуну.

Виконані дослідження впливу діаметра графітних включень на відносне подовження ковкого чавуну; кількості виділинь графіту на відносне подовження ковкого чавуну; впливу розміру феритного зерна на відносне подовження ковкого чавуну; впливу міцність ковкого чавуну на його відносне подовження. Отримано рівняння множинної кореляції залежності відносного подовження від структури ковкого чавуну.

З'ясовано, що при числі графітних включень менше 50 штук на 1 мм<sup>2</sup> шлифа зі збільшенням числа графітних включень збільшується і відносне подовження. З підвищенням вмісту перліту у ковкому чавуні відносне подовження зменшується. При зростанні розміру феритного зерна більше 45 мкм, відносне подовження феритного ковкого чавуну починає збільшуватися.

Показано також, що зі збільшенням пластичності ( $\delta\%$ ), міцність ( $\sigma_B$ ) феритного ковкого чавуну знижується.

Встановлено, що між відносним подовженням ковкого чавуну і твердістю існує тісний лінійний зворотній кореляційний зв'язок, про що свідчить високе значення коефіцієнта кореляції ( $r = 0,3012$ ).

**ковкий чавун, відносне подовження, кореляція, рівняння регресії**

## ABSTRACT

Myronov D. S. Research on the effect of structure on the relative elongation of ductile iron, specialty 131 "Applied Mechanics", OPP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2024. - 54p. Illustration materials 10 images.

The purpose of the study – is to study the influence of the structure on the relative elongation of ductile iron. The research was carried out according to the methods of mathematical statistics - verification by correlation analysis in the environment of Microsoft Office Excel and MathCAD.

In the work, data were obtained in order to establish the degree of reliability of the investigated dependences of relative elongation on the parameters and structure of ductile iron.

Studies of the influence of the diameter of graphite inclusions on the relative elongation of ductile iron have been carried out; the number of graphite releases on the relative elongation of ductile iron; the effect of ferrite grain size on the relative elongation of ductile iron; influence of ductile iron strength on its relative elongation. The equation of the multiple correlation of the dependence of the relative elongation on the structure of ductile iron was obtained.

It was found that when the number of graphite inclusions is less than 50 pieces per  $1 \text{ mm}^2$  of the grind, with an increase in the number of graphite inclusions, the relative elongation also increases. As the pearlite content in ductile iron increases, the relative elongation decreases. As the ferrite grain size increases to more than  $45 \text{ }\mu\text{m}$ , the relative elongation of ferritic ductile iron begins to increase.

It is also shown that with an increase in plasticity, the strength of ferritic ductile iron decreases.

It was established that there is a close linear inverse correlation between the relative elongation of ductile iron and hardness, which is evidenced by the high value of the correlation coefficient ( $r = 0.3012$ ).

**ductile iron, relative vibration, correlation, regression equation**

## **ВСТУП**

### **Актуальність теми**

Ковкий чавун як конструкційний матеріал з добрими фізичними, механічними та технологічними властивостями має широке використання в багатьох галузях виробництва. Основна перевага ковкого чавуну полягає в однорідності його властивостей по перерізу виливка, відсутність напруг при цьому, також високих механічних властивостей та дуже доброю оброблюваністю.

Ковкий чавун застосовується переважно для виливків з товщиною стінок від 3 до 50 мм – це пов'язано з отриманням однорідної будови і властивостей у всіх перерізах виливка.

В ковкому чавуні твердість головним чином залежить від металевої матриці, тобто від графіту, причому найбільший вплив має його форма. Міцність і пластичність ковкого чавуну залежать від металевої матриці, графіту та його кількості.

Найбільшу міцність можна отримати при дисперсному перліті та малої кількості компактного графіту, а найбільшу пластичність можливо отримати при фериті та компактному графіті.

Отже необхідно проводити дослідження ковкого чавуну, які направлені на покращення його якості, а також зниження вартості виливків із ковкого чавуну.

Використання ковкого чавуну для виробництва виливків в машинобудівній промисловості буде впливати на підвищення як зносостійкості, так і експлуатаційних властивостей деталей – це стосується, в першу, чергу автотракторне та сільськогосподарське машинобудування.

Дослідження впливу структури ковкого чавуну на його відносне подовження наразі є актуальним завданням, яке спрямовано на підвищення міцності і твердості ковкого чавуну в залежності від його структури.

## **Мета та задачі дослідження**

*Мета дослідження* – вивчення впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну.

Необхідно вирішити наступні *задачі*:

- дослідити вплив діаметра графітних включень на відносне подовження ковкого чавуну;
- дослідити вплив кількості виділинь графіту на відносне подовження ковкого чавуну;
- дослідити вплив вмісту перліту на відносне подовження ковкого чавуну;
- дослідити вплив розміру феритного зерна на відносне подовження ковкого чавуну;
- дослідити вплив міцності ковкого чавуну на його відносне подовження;
- дослідити вплив між відносним подовженням і твердістю ковкого чавуну;
- отримати рівняння множинної кореляції залежності відносного подовження від структури ковкого чавуну.

## ***Об'єкт і предмет дослідження***

*Об'єктом дослідження* є ковкий чавун. *Предметом дослідження* є вивчення впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну.

## **Наукова новизна одержаних результатів**

Вперше проведено вивчення впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну для такого складу: C = 2,4–3,28%; Si = 0,78–1,37%; Mn = 0,41–0,63%; до 0,18% S.

З'ясовано, що із структурних складових найбільший вплив на відносне подовження ковкого чавуну має вміст перліту. Суттєвий вплив на відносне

подовження ковкого чавуну мають технологія плавки, заливки та модифікування, а також сама структура чавуну.

### **Практичне значення отриманих результатів**

Проведене дослідження впливу структури ковкого чавуну на його відносне подовження показує, що треба регулювати і коригувати його структуру. Вагомий вплив на відносне подовження ковкого чавуну має форма графітових включень, а також їх розмір.

### **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. Цюріх, Швейцарія. Отримано сертифікат (див. Додаток 1).

## РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ КОВКОГО ЧАВУНУ

### 1.1. Вивчення впливу структури ковкого чавуну на його відносне подовження

В ковкому чавуні структурні складові мають відповідно різні механічні властивості, в першу чергу, зі зміною їх кількості складових буде змінюватись і співвідношення між механічними властивостями ковкого чавуну, як це показано в табл. 1.1 [1-8].

Таблиця 1.1

Структурні складові ковкого чавуну та їх властивості

| Структурна<br>складова | Механічні властивості           |              |
|------------------------|---------------------------------|--------------|
|                        | $\sigma_B$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % |
| Перліт                 | 70,0                            | 15,0         |
| Феріт                  | 40,0                            | 40,0         |

При аналізі табл. 1.1 слідує, що завдяки підбору співвідношення між кількістю перліту та фериту можливо одержати ковкий чавун з відповідно оптимальним співвідношенням міцності і пластичності. Як відомо, що міцність ковкого чавуну буде підвищуватися зі збільшенням складу вуглецю, а це впливає на зниження його пластичних властивостей.

Вагомий вплив як на механічні, так і фізичні властивості ковкого чавуну має щільність виливка. Основним фактором є графітова фаза, яка впливає на щільність самої металевої матриці. З літературних джерел маємо наступне твердження, що зменшення розміру графітних включень буде впливати на збільшення одночасно і міцності і пластичності, але це стосується феритного ковкого чавуну, він цим і відрізняється від інших металів та сплавів на основі Fe [8-10].

## 1.2. Вивчення впливу діаметра графітних включень та величини зерна на відносне подовження ковкого чавуну

Суттєвий вплив на міцність ковкого чавуну має форма графітного включення (рис. 1. 1).

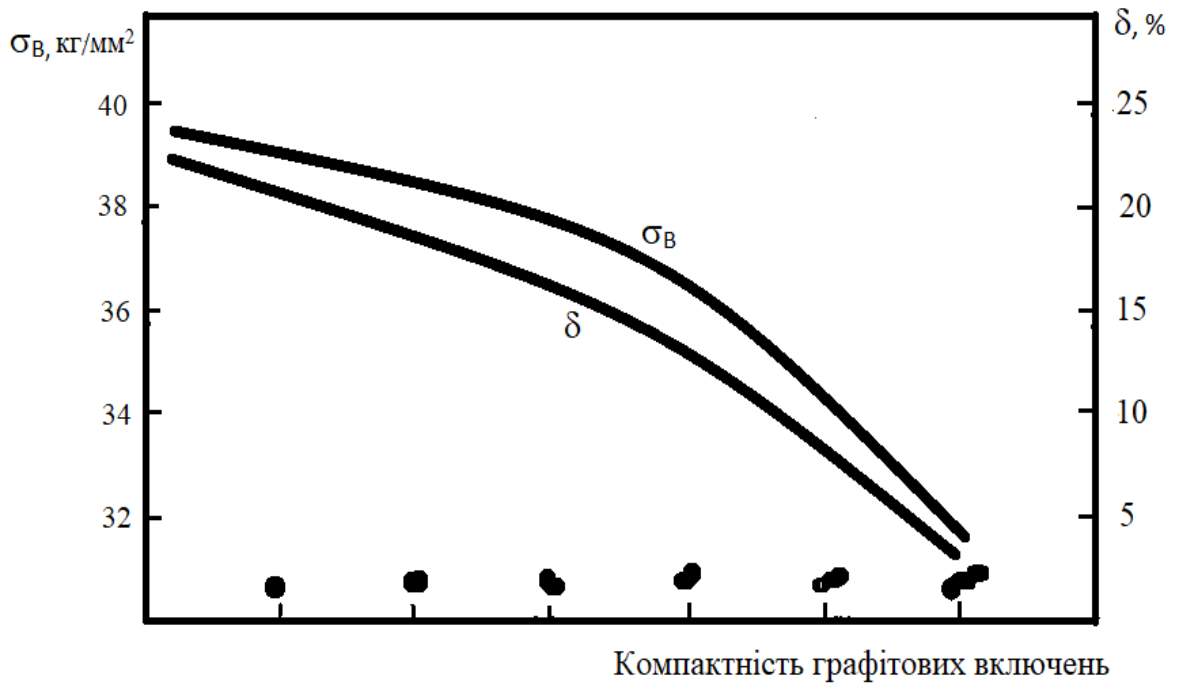


Рисунок 1.1 – Вплив компактності графітових включень на міцність ковкого чавуну

Істотно знижується пластичність ковкого чавуну при наближенні форми графітних включень до пластинчастих (рис. 1.1). Зернистість механічної матриці також має вплив на механічні характеристики ковкого чавуну, як видно з аналізу табл. 1.2 [10-14].

Таблиця 1.2

Вплив величини зерна на міцність чистого заліза

| Середній діаметр зерна фериту, мм | $\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % | Середній діаметр зерна, мм | $\sigma_b$ , кг/мм <sup>2</sup> | $\delta$ , % |
|-----------------------------------|---------------------------------|--------------|----------------------------|---------------------------------|--------------|
| 9,7                               | 16,8                            | 28,8         | 0,2                        | 26,8                            | 48,8         |
| 7,0                               | 30,6                            | 30,6         | 0,16                       | 27,0                            | 50,7         |
| 2,5                               | 39,5                            | 39,5         | 0,11                       | 28,4                            | 50,0         |

### 1.3. Вивчення впливу числа виділень графіту на відносне подовження ковкого чавуну

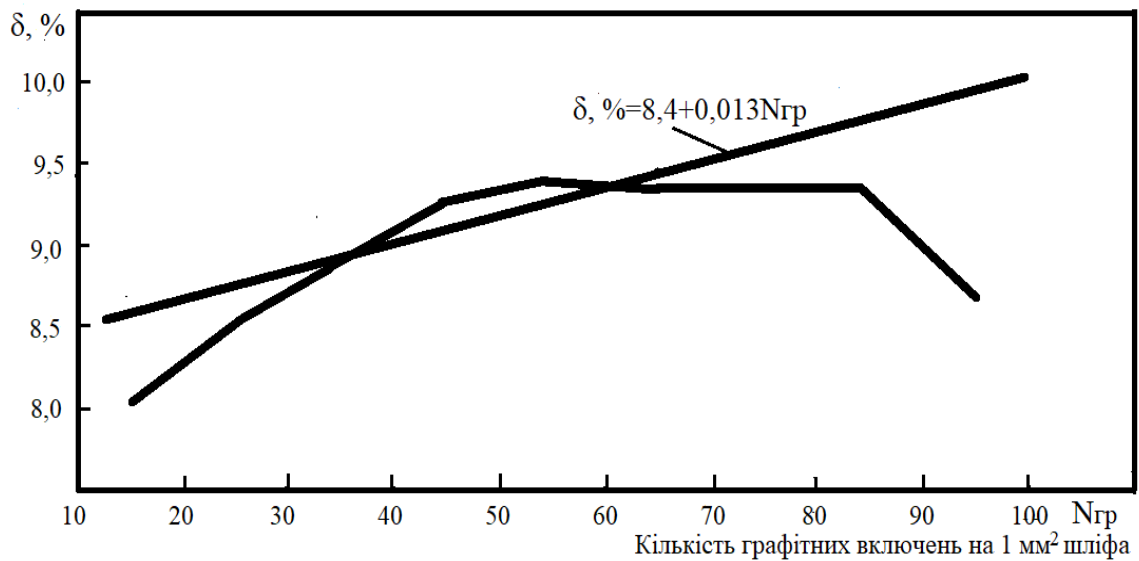


Рисунок 1.2 – Залежність кількості включень графіту на відносне подовження ковкого чавуну

З рис. 1.2 видно, що при числі графітних включень менше 50 штук на  $1 \text{ мм}^2$  шліфа зі збільшенням числа графітних включень збільшується відносне подовження.

### 1.4. Вивчення впливу між різними показниками механічних властивостей ковкого чавуну

Залежності між міцністю та їх твердістю, а також пластичністю зустрічаються в інформаційних джерелах. Їх вид приведений в табл. 1.3 [14].

Таблиця 1.3

Залежності між міцністю, твердістю та пластичністю чавунів

| Вид чавуну                | Залежність                   |
|---------------------------|------------------------------|
| Феритний ковкий чавун     | $\sigma_B = 12 + 0,2HB$      |
|                           | $\delta \% = 0,2 + 0,1HB$    |
| Чавун з кулястим графітом | $\sigma_B = 70,5 - 0,05HB$   |
|                           | $\delta \% = 5,48 - 0,015HB$ |

Залежності такого виду будуть специфічні для конкретних умов виробництва та застосування в визначених зонах зміни показників механічних властивостей (табл. 1.3) [8-14].

Як змінюється залежність міцності від відносного подовження ковкого чавуну наведена на рис. 1.3.

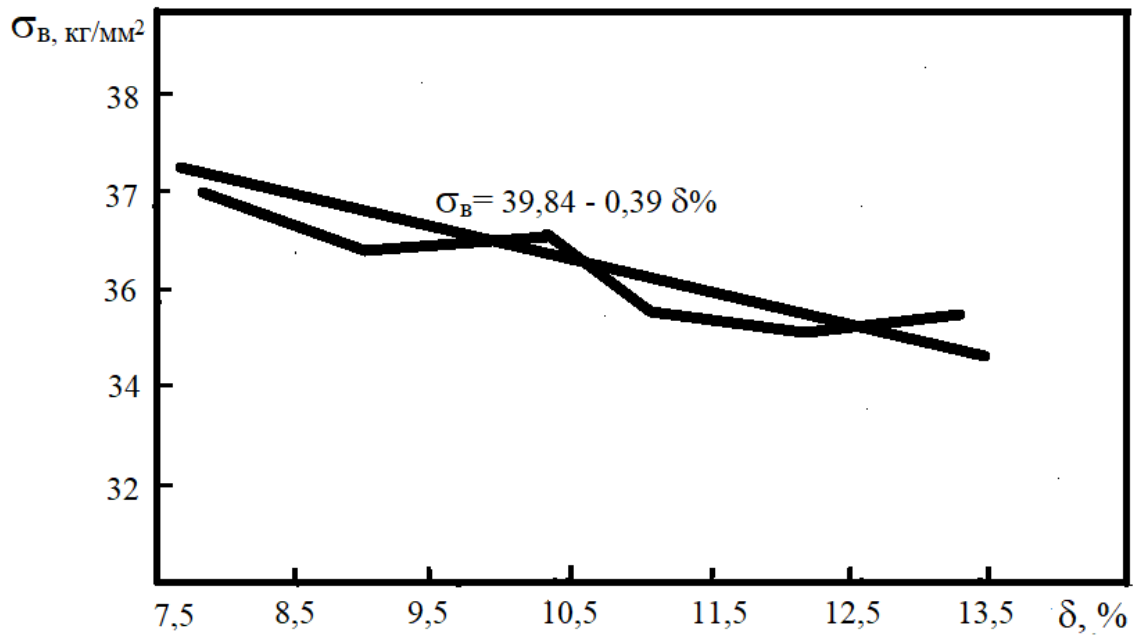


Рисунок 1.3 – Залежність міцності від відносного подовження ковкого чавуну

## РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

### 2.1. Об'єкт і предмет дослідження

*Об'єктом* проведення дослідження є ковкий чавун з відповідним хімічним складом згідно ДСТУ EN 1562:2019  $C = 2,4\text{--}3,28\%$ ;  $Si = 0,78\text{--}1,37\%$ ;  $Mn = 0,41\text{--}0,63\%$ ; до  $0,18\%$  S. P = до  $0,14\%$ ; [15], який широко використовується в промисловості. Ковкий чавун буде отримуватися шляхом графітизуючого відпалу білого чавуну. *Предметом дослідження* є вивчення впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну.

Ковкий чавун виробляється здійсненням графітизуючого відпалу із білого чавуну. В процесі відпалу зв'язаний вуглець знаходиться у вигляді цементиту розпадається, а потім уже буде виділятися у виді включень графіту відповідно пластівчастої форми, або також можливо у вигляді і вуглецю відпалу  $Fe + C_{\text{від}} \rightarrow Fe_3C$ .

### 2.2. Методика і матеріал дослідження

Досліджуючи відносне подовження ковкого чавуну відливали відповідно стандартні зразки згідно з ДСТУ EN 1562:2019. Випробування відносного подовження отриманих зразків виконуються згідно ДСТУ EN 1562:2019 [15]. У випробувальній лабораторії виконували випробовування зразків на відносне подовження ковкого чавуну, а результати відповідно фіксували в протоколах [15].

### 2.3. Методика для отримання залежностей впливу структури ковкого чавуну на його відносне подовження

Вивчення властивостей ковкого чавуну в залежності від структури – це відносного подовження необхідно як для підвищення якості чавуну, так і вдосконалення більш ефективних технологічних процесів його виготовлення.

Вплив структури на відносне подовження ковкого чавуну проводили за допомогою методів теорія кореляції та регресійного аналізу [16- 20].

Апроксимували функцію у вигляді полінома

$$y = b_3x^n + \dots + b_2x^2 + b_1x + b_0. \quad (2.1)$$

Залежності відносного подовження ковкого чавуну від його структури шукали у виді таких функцій як [15, 16, 20]:

– лінійної  $y = b_1x + b_0;$  (2.2)

– поліноміальної другого ступеня  $y = b_2x^2 + b_1x + b_0;$  (2.3)

Використовуючи кореляційний та регресійний аналіз і математичні методи побудови моделей при дослідженні впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну, визначали параметри математичних моделей і виконували перевірку їх на адекватність [16-21].

Побудова регресійної моделі необхідна для визначення функції  $y(b, x)$ , функціонал нев'язки для якої повинен бути мінімальним

$$f(b) = \sum_{i=1}^n (y(b, x) - y_i)^2 \rightarrow \min, \quad (2.4)$$

де  $y(b, x)$  – регресійна модель, функція для апроксимації залежності в  $i$ -й точці;  $y_i$  – значення емпіричної залежності;  $b$  – вектор параметрів;  $x$  – вектор незалежних змінних.

Рівняння регресії має такий вид:

$$y = b_1x + b_0. \quad (2.5)$$

де  $b_0, b_1$  невідомі коефіцієнти.

Далі рівняння регресії приведемо у такому виді

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x)^2 \rightarrow \min . \quad (2.6)$$

Вирази для розрахунку коефіцієнтів  $b_0, b_1$ .

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} ; \quad (2.7)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} . \quad (2.8)$$

Між вхідними і вихідними параметрами залежність задаємо у вигляді рівняння регресії [16-21]:

$$y = b_2 x^2 + b_1 x + b_0 . \quad (2.9)$$

Коефіцієнти регресії  $b_0, b_1, b_2$  визначаємо з системи рівнянь при використанні методу єдиного ділення Гауса і знаходимо коефіцієнти апроксимуючої функції.

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2)^2 \rightarrow \min . \quad (2.10)$$

Визначення тісноти зв'язку між параметрами  $x$  і  $y$  здійснюємо, використовуючи коефіцієнт кореляційного відношення Пірсона та розраховуємо його за таким виразом [16-21]

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

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

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

$y_i$  – значення показника міцності ковкого чавуну;

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

$b$  – коефіцієнт регресії при параметрі  $x$  в рівнянні регресії знаходимо за МНК [16-21]:

$\sigma_x^2$  – 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  $y$ :

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}. \quad (2.15)$$

Для нелінійних залежностей кореляційне відношення

$$\eta = \frac{\sigma^2(y_{\text{per}})}{\sigma^2(y)}, \quad (2.16)$$

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

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

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

$$\sigma^2(y) = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] - \bar{y}^2. \quad (2.18)$$

За відомими методами визначаємо статистичну значущість коефіцієнтів парної кореляції [16,17].

Перевіримо залежності між величинами  $x$  і  $y$  для лінійної кореляції [16-21]

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i y_i - \bar{x} \bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (2.19)$$

де  $n$  – кількість виборок;  $\bar{x}, \bar{y}$  – середні значення величин  $x, y$ ;  $\sigma_x, \sigma_y$  – середньоквадратичні відхилення [15-19]

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

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

Якщо  $r = 1$  маємо наявність лінійного функціонального зв'язку між відповідними величинами як  $x$  і  $y$ , коли  $r > 0,5$  маємо помітний лінійний зв'язок між величинами  $x$  і  $y$ .

Для оцінювання величин  $b_1, b_0$  у рівнянні (2.5) застосовуємо МНК. Кращі значення параметрів  $b_1, b_0$  будуть такі, для яких сума квадратів відхилень емпіричних значень  $y_i$  від розрахункових значень  $y_p$  має мінімальне значення [16-21].

Перевірка коефіцієнтів регресії на їх значущість

– визначаємо середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad (2.22)$$

– визначаємо похибку коефіцієнта  $b_0$

$$\sigma_{b_0} = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}; \quad (2.23)$$

– визначаємо похибку коефіцієнта  $b_1$ .

$$\sigma_{b_1} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (2.24)$$

Критерій Стьюдента для перевірки коефіцієнтів регресії на значущість [16-21].

$$t_p = \frac{b_i}{\sigma_{b_i}}. \quad (2.25)$$

Табличне значення  $t$ -критерія Стюдента знаходимо для відповідних чисел ступенів вільності  $f = N - 1$ , а також рівня значимості при  $\alpha = 0,05$ . Потім теоретичне значення  $t$ -критерія Стюдента відповідно порівнюємо з табличним значенням.

При  $t_p \geq t_{\text{табл.}}$ , такі коефіцієнти  $b_i$  будуть відповідно статистично значимими, а коли  $t_p \leq t_{\text{табл.}}$ , коефіцієнти будуть відповідно статистично не значимі.

Адекватність рівняння регресії [16-21] можливо визначити за критерієм Фішера

$$F_p = \frac{(n-2)\left(\sum_{i=1}^n y_i^2\right) - \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^n y_i\right)^2}{(n-1)\sum_{i=1}^n (y_i - b_1x - b_0)^2}. \quad (2.26)$$

Рівняння регресії за виразами (2.2), (2.3), підставимо у вираз (2.26), а значення коефіцієнтів регресії беремо з таблиць обробки даних.

$F_p$  критерій Фішера – це величина, що вказує на розподіл Фішера із відповідними ступенями вільності  $f_1 = n - 1$ ,  $f_2 = n - k$ . За таблицями для критерію Фішера далі при рівні значущості  $\alpha = 0,05$  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 відповідно буде адекватне.

## **РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ КОВКОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО ВІДНОСНЕ ПОДОВЖЕННЯ**

### **3.1. Вивчення впливу структури феритного ковкого чавуну на відносне подовження (оброблення даних методом кореляції залежності відносного подовження ковкого чавуну від структури)**

При вивченні впливу структури феритного ковкого чавуну на відносне подовження були побудовані кореляційні табл. 3.1-3.4 для парних залежностей

$$\delta\% = f(N_{\text{гр}}); \quad \delta\% = f(D_{\text{гр}}); \quad \delta\% = f(\Pi\%); \quad \delta\% = f(\Phi).$$

Заповнення і обробка кореляційних таблиць виконувалась в порядку, аналогічному з описаним в розділі 3.1.1 [16-21].

#### **3.1.1. Вплив числа виділень графіту на відносне подовження ковкого чавуну**

Для вивчення впливу кількості виділень графіту на відносне подовження ковкого чавуну була побудована кореляційна табл. 3.1 та знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.1).

Для визначення теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти:

$$a' = 0,8779; \quad b' = 0,1314.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\delta\% = 8,40 + 0,013N_{\text{гр}}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1628.$$

Перевіряємо наявність кореляції за допомогою  $t$ -критерію Стюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1628}{\sqrt{1 - 0,1628^2}} \cdot \sqrt{412} = 3,35.$$

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

За  $t$ -критерієм Фішера за виразом (2.26) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо  $F_{\text{р.}} = 1,27 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , то рівняння регресії адекватне.

При числі графітних включень більше 80 штук на 1 мм<sup>2</sup> шліфа спостерігається навіть зниження пластичності феритного ковкого чавуну.

### **3.1.2. Вплив вмісту перліту на відносне подовження феритного ковкого чавуну**

Для вивчення впливу вмісту перліту на відносне подовження феритного ковкого чавуну була побудована кореляційна табл. 3.2 та знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.2).

Для визначення теоретичної лінії регресії були визначені коефіцієнти

$$a' = 1,0778; b' = -0,1315.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\delta\% = 9,41 - 0,066 \text{ П}\%.$$

Таблиця 3.1

Кореляція між числом графітних включень і відносним подовженням ковкого чавуну

| $y'$           | $x'$                       | -2     | -1      | 0        | 1        | 2        | 3        | 4       | 5       | 6      | Всього |          |                  |
|----------------|----------------------------|--------|---------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|--------|--------|----------|------------------|
|                | $\delta\%$ $N_{\text{гп}}$ | 10-20  | 20-30   | 30-40    | 40-50    | 50-60    | 60-70    | 70-80   | 80-90   | 90-100 | $m_y$  | $m_y y'$ | $m_y \cdot y'^2$ |
| 0              | 7,5-8,5                    | 5      | 34      | 59       | 39       | 39       | 21       | 20      | 9       | 2      | 228    | 0        | 0                |
| 1              | 8,5-9,5                    | 1<br>1 | 7<br>7  | 8<br>8   | 13<br>13 | 10<br>10 | 7<br>7   | 3<br>3  | 2<br>2  | 1<br>1 | 52     | 52       | 52               |
| 2              | 9,5-10,5                   | —      | 2<br>1  | 24<br>12 | 30<br>15 | 18<br>9  | 12<br>6  | 12<br>6 | 4<br>2  | 2<br>1 | 52     | 104      | 208              |
| 3              | 10,5-11,5                  | —      | 15<br>5 | 30<br>10 | 30<br>10 | 27<br>9  | 33<br>11 | 27<br>9 | 3<br>1  | —      | 55     | 165      | 495              |
| 4              | 11,5-12,5                  | —      | —       | 12<br>3  | 16<br>4  | 12<br>3  | —        | 4<br>1  | 16<br>4 | —      | 15     | 60       | 240              |
| 5              | 12,5-13,5                  | —      | —       | —        | 20<br>4  | 30<br>6  | 5<br>1   | 5<br>1  | —       | —      | 12     | 60       | 300              |
| $m_x$          |                            | 6      | 47      | 92       | 85       | 76       | 46       | 40      | 18      | 4      | 414    | 441      | 1295             |
| $m_{xy} y'$    |                            | 1      | 24      | 75       | 109      | 97       | 57       | 51      | 25      | 3      | 441    | —        | —                |
| $\bar{y}'_x$   |                            | 0,166  | 0,51    | 0,804    | 1,282    | 1,276    | 1,239    | 1,275   | 1,388   | 0,75   | 8,69   | —        | —                |
| $\bar{y}_x$    |                            | 8,166  | 8,51    | 8,804    | 9,282    | 9,276    | 9,239    | 9,275   | 9,388   | 8,75   | 80,69  | —        | —                |
| $m_x x'$       |                            | -12    | -47     | 0        | 85       | 152      | 138      | 160     | 90      | 24     | 590    | —        | —                |
| $m_x x'^2$     |                            | 24     | 47      | 0        | 85       | 304      | 414      | 640     | 450     | 144    | 2108   | —        | —                |
| $m_{xy} y' x'$ |                            | -2     | -24     | 0        | 109      | 194      | 171      | 204     | 125     | 18     | 795    | —        | —                |

Таблиця 3.2

Кореляція між кількістю перліту і відносним подовженням ковкого чавуну

| $y'$           | $x'$                 | -2      | -1       | 0        | 1       | 2      | 3       | 4      | Всього |          |                  |
|----------------|----------------------|---------|----------|----------|---------|--------|---------|--------|--------|----------|------------------|
|                | $\delta\%$ / $\Pi\%$ | 0-2     | 2-4      | 4-6      | 6-8     | 8-10   | 10-12   | 12-14  | $m_y$  | $m_y y'$ | $m_y \cdot y'^2$ |
| 0              | 7,5-8,5              | 13      | 46       | 62       | 51      | 16     | 17      | 20     | 225    | 0        | 0                |
| 1              | 8,5-9,5              | 9<br>9  | 10<br>10 | 21<br>21 | 8<br>8  | 4<br>4 | 2<br>2  | 3<br>3 | 57     | 57       | 57               |
| 2              | 9,5-10,5             | 12<br>6 | 26<br>13 | 24<br>12 | 6<br>3  | 8<br>4 | 10<br>5 | 8<br>4 | 47     | 94       | 188              |
| 3              | 10,5-11,5            | 21<br>7 | 66<br>22 | 30<br>10 | 12<br>4 | —      | 18<br>6 | —      | 49     | 147      | 441              |
| 4              | 11,5-12,5            | 4<br>1  | 28<br>7  | —        | 16<br>4 | 8<br>2 | 8<br>2  | 4<br>1 | 17     | 68       | 272              |
| 5              | 12,5-13,5            | 5<br>1  | 30<br>6  | 5<br>1   | 5<br>1  | —      | 5<br>1  | —      | 10     | 50       | 250              |
| $m_x$          |                      | 37      | 104      | 106      | 71      | 26     | 33      | 28     | 405    | 416      | 1208             |
| $m_{xy} y'$    |                      | 51      | 160      | 80       | 47      | 20     | 43      | 15     | 416    | —        | —                |
| $\bar{y}'_x$   |                      | 1,378   | 1,538    | 0,755    | 0,662   | 0,769  | 1,303   | 0,5337 | 6,94   | —        | —                |
| $\bar{y}_x$    |                      | 9,378   | 9,538    | 8,755    | 8,662   | 8,769  | 9,303   | 8,5357 | 62,94  | —        | —                |
| $m_x x'$       |                      | -74     | -104     | 0        | 71      | 52     | 99      | 112    | 156    | —        | —                |
| $m_x x'^2$     |                      | 148     | 104      | 0        | 71      | 104    | 297     | 448    | 1172   | —        | —                |
| $m_{xy} y' x'$ |                      | -102    | -160     | 0        | 47      | 40     | 129     | 60     | 14     | —        | —                |

Перевіряємо наявність кореляції між відносним рівнянням і вмістом перліту за допомогою  $t$ -критерію Стюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1569}{\sqrt{1 - 0,1569^2}} \cdot \sqrt{403} = 3,18.$$

Так як  $t_{\text{роз}} > t_{\text{табл}} = 1,96$ , то між цими факторами існує кореляція.

За  $t$ -критерієм Фішера за виразом (2.26) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо  $F_{\text{р.}} = 1,53 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , то рівняння регресії адекватне.

### **3.1.3. Вплив розміру феритного зерна на відносне подовження ковкого чавуну**

При вивченні впливу розміру феритного зерна на відносне подовження ковкого чавуну була побудована кореляційна табл. 3.3 та знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.3).

Для визначення рівняння теоретичної лінії регресії були знайдені коефіцієнти:

$$a' = 1,0837; b' = 0,1675.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\delta\% = 8,33 + 0,017\Phi.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1094.$$

Перевірка кореляції за допомогою  $t$ -критерію Стюдента підтверджує наявність кореляції між відносним подовженням та розмірами феритного зерна.

За  $t$ -критерієм Фішера за виразом (2.26) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо  $F_{\text{р.}} = 0,78 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , то рівняння регресії адекватне.

Для перевірки гіпотези про параболічну залежність відносного подовження від розміру зерна фериту була побудована розширена кореляційна табл. 3.3

Таблиця 3.3

Кореляція між відносним подовженням і розміром феритного зерна ковкого чавуну

| $y'$         | $x'$                       | -2      | -1       | 0        | 1        | 2       | Всього |                |                  |
|--------------|----------------------------|---------|----------|----------|----------|---------|--------|----------------|------------------|
|              | $\Phi$ , мкм<br>$\delta\%$ | 20-30   | 30-40    | 40-50    | 50-60    | 60-70   | $m_y$  | $m_y \cdot y'$ | $m_y \cdot y'^2$ |
| 0            | 7,5-8,5                    | 14      | 82       | 108      | 22       | 4       | 230    | 0              | 0                |
| 1            | 8,5-9,5                    | 5<br>5  | 22<br>22 | 15<br>15 | 10<br>10 | 2<br>2  | 54     | 54             | 54               |
| 2            | 9,5-10,5                   | 10<br>5 | 28<br>14 | 44<br>22 | 10<br>5  | 6<br>3  | 49     | 98             | 196              |
| 3            | 10,5-11,5                  | 9<br>3  | 51<br>17 | 60<br>20 | 24<br>8  | 21<br>7 | 55     | 165            | 495              |
| 4            | 11,5-12,5                  | 8<br>2  | 20<br>5  | 24<br>6  | 4<br>1   | —       | 14     | 56             | 224              |
| 5            | 12,5-13,5                  | —<br>2  | 10<br>2  | 25<br>5  | 15<br>3  | 5<br>1  | 11     | 55             | 275              |
| $m_x$        |                            | 29      | 1423     | 176      | 49       | 17      | 413    | 428            | 1244             |
| $m_{xy}y'$   |                            | 32      | 131      | 168      | 63       | 34      | 428    | —              | —                |
| $\bar{y}'_x$ |                            | 1,103   | 0,922    | 0,954    | 1,285    | 2       | 6,26   | —              | —                |
| $\bar{y}_x$  |                            | 9,103   | 8,922    | 8,954    | 9,285    | 10      | 36,26  | —              | —                |
| $m_x x'$     |                            | -58     | -142     | 0        | 49       | 34      | -117   | —              | —                |

|                                |        |        |        |        |        |        |   |   |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|---|
| $m_x x'^2$                     | 116    | 142    | 0      | 49     | 68     | 375    | — | — |
| $m_{xy} y'x'$                  | -64    | -131   | 0      | 63     | 68     | -64    | — | — |
| $m_x x'^3$                     | -232   | -142   | 0      | 49     | 136    | -189   | — | — |
| $m_x x'^4$                     | 464    | 142    | 0      | 49     | 272    | 927    | — | — |
| $\bar{y}'_x$                   | 0,8208 | 0,9141 | 1,0612 | 1,2624 | 1,5168 | 5,57   | — | — |
| $m_{xy} y'x'^2$                | 128    | 131    | 0      | 63     | 68     | 390    | — | — |
| $(\bar{y}'_x - \bar{y})^2 m_x$ | 1,3456 | 2,1158 | 0,1055 | 2,5039 | 3,9236 | 9,9944 | — | — |
| $\bar{y}_x$                    | 8,8208 | 8,9141 | 9,0612 | 9,2624 | 9,5168 | 45,57  | — | — |

Для одержання теоретичної лінії регресії у вигляді параболи розраховуємо коефіцієнти:

$$a' = 1,0612; b' = 0,1740; c' = 0,0269.$$

Теоретична лінія регресії, наведена на рис. 4.3, має вигляд:

$$\delta\% = 8,82 - 0,007\Phi + 0,0003\Phi^2.$$

Кореляційне відношення дорівнює:

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\frac{9,9944}{413}}{\frac{1244}{413} - \left(\frac{428}{413}\right)^2}} = 0,1114.$$

Оскільки розраховане кореляційне відношення виявилось лише трохи більше коефіцієнта кореляції, то гіпотеза про криволінійну залежність відносного подовження від розміру феритного зерна не підтверджується.

#### **3.1.4. Вплив середнього діаметра графітних включень на відносне подовження ковкого чавуну**

Для вивчення впливу середнього діаметра графітних включень на відносне подовження ковкого чавуну була побудована кореляційна таблиця 3.4 і знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.4).

Для визначення рівняння теоретичної лінії регресії були визначені коефіцієнти:

$$a' = 0,9899; b' = -0,05662.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\delta\% = 9,28 - 0,0038D_{\text{гр}}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,05814.$$

Перевірку про наявність кореляції між відносним подовженням та середнім діаметром графітних включень виконуємо за допомогою  $t$ -критерію Стьюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,05814}{\sqrt{1 - 0,05814^2}} \cdot \sqrt{407} = 1,18.$$

Так як  $t_{\text{роз}} < t_{\text{табл}}$ , то гіпотеза про наявність кореляції між відносним подовженням та середнім діаметром графітних включень не підтверджується.

За  $t$ -критерієм Фішера за виразом (2.26) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо  $F_{\text{р.}} = 1,43 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.4

Кореляція відносного подовження від середнього діаметра виділень графіту

| $y'$         | $x'$                                   | -3      | -2       | -1       | 0        | 1       | 2        | Всього |                |                  |
|--------------|----------------------------------------|---------|----------|----------|----------|---------|----------|--------|----------------|------------------|
|              | $\delta\%$ $D_{\text{ГР}}, \text{МКМ}$ | 25-40   | 40-55    | 55-70    | 70-85    | 85-100  | 100-115  | $m_y$  | $m_y \cdot y'$ | $m_y \cdot y'^2$ |
| 0            | 7,5-8,5                                | 18      | 60       | 33       | 72       | 21      | 22       | 226    | 0              | 0                |
| 1            | 8,5-9,5                                | 4<br>4  | 12<br>12 | 11<br>11 | 18<br>18 | 9<br>9  | 5<br>5   | 59     | 59             | 59               |
| 2            | 9,5-10,5                               | 4<br>2  | 18<br>9  | 22<br>11 | 22<br>11 | 8<br>4  | 20<br>10 | 47     | 94             | 188              |
| 3            | 10,5-11,5                              | 3<br>1  | 45<br>15 | 33<br>11 | 45<br>15 | 18<br>6 | 12<br>4  | 52     | 156            | 468              |
| 4            | 11,5-12,5                              | —<br>5  | 20<br>5  | —        | 40<br>10 | —       | 4<br>1   | 16     | 64             | 256              |
| 5            | 12,5-13,5                              | 10<br>2 | 20<br>4  | 5<br>1   | 5<br>1   | —       | 5<br>1   | 9      | 45             | 225              |
| $m_x$        |                                        | 27      | 105      | 67       | 127      | 40      | 43       | 409    | 418            | 1196             |
| $m_{xy}y'$   |                                        | 21      | 115      | 71       | 130      | 35      | 46       | 418    | —              | —                |
| $\bar{y}'_x$ |                                        | 0,777   | 1,095    | 1,059    | 1,023    | 0,875   | 1,069    | 13,89  | —              | —                |
| $\bar{y}_x$  |                                        | 8,777   | 9,095    | 9,059    | 9,023    | 8,875   | 9,069    | 53,89  | —              | —                |
| $m_x x'$     |                                        | -81     | -210     | -67      | 0        | 40      | 86       | -232   | —              | —                |
| $m_x x'^2$   |                                        | 243     | 420      | 67       | 0        | 40      | 172      | 942    | —              | —                |
| $m_{xy}y'x'$ |                                        | -63     | -230     | -71      | 0        | 35      | 92       | -139   | —              | —                |

### 3.1.5. Одержання рівняння множинної кореляції залежності відносного подовження від структури ковкого чавуну

Щоб одержати загальну картину впливу структури на відносне подовження феритного ковкого чавуну, було одержане рівняння множинної кореляції впливу на відносне подовження числа графітних включень, вміст перліту, розміру феритного зерна. Ці фактори найбільш сильно впливають на відносне подовження феритного ковкого чавуну.

Позначимо:

$$\text{П}\% = x_4; \quad N_{\text{Гр}} = x_5; \quad \Phi = x_3; \quad \delta\% = y.$$

Рівняння множинної кореляції в натуральному масштабі буде мати вигляд:

$$y = a + bx_3 + cx_4 + dx_5.$$

Це ж рівняння в стандартизованому виді має вигляд:

$$t_{yx_3x_4x_5} = \beta_3 t_3 + \beta_4 t_4 + \beta_5 t_5.$$

Коефіцієнти рівняння визначаємо із системи рівнянь:

$$\begin{cases} r_{y3} = \beta_3 + \beta_4 r_{43} + \beta_5 r_{53} \\ r_{y4} = \beta_3 r_{34} + \beta_4 + \beta_5 r_{54} \\ r_{y5} = \beta_3 r_{35} + \beta_5 r_{45} + \beta_5. \end{cases}$$

Після підстановки в цю систему рівнянь коефіцієнтів кореляції одержимо

$$\begin{cases} 0,1094 = \beta_3 + 0 \cdot \beta_4 + 0 \cdot \beta_5 \\ -0,1569 = 0 \cdot \beta_3 + \beta_4 - 0,1889\beta_5 \\ 0,1628 = 0 \cdot \beta_3 - 0,1889\beta_4 + \beta_5. \end{cases}$$

Розв'язавши цю систему рівнянь, одержимо:

$$\beta_3 = 0,1094; \beta_4 = -0,13089; \beta_5 = 0,13808.$$

Для визначення коефіцієнтів регресії в натуральному масштабі розраховуємо дисперсію та середнє значення результативної ознаки ( $\delta\%$ ):

з табл. 3.4

$$\sigma_y^2 = \left[ \frac{1196}{409} - \left( \frac{418}{409} \right)^2 \right] = 1,876;$$
$$\sigma_y = 1,369;$$

з табл. 3.4

$$\bar{y} = \frac{441}{414} + 8,0 = 9,0652.$$

Дисперсії і середнє значення факторних ознак були розраховані раніше.

Коефіцієнти рівняння множинної кореляції дорівнюють:

$$b = \beta_3 \frac{\sigma_y}{\sigma_3} = 0,1094 \frac{1,369}{8,5715} = 0,01747;$$

$$c = \beta_4 \frac{\sigma_y}{\sigma_4} = -0,13089 \frac{1,369}{3,243} = -0,05525;$$

$$d = \beta_5 \frac{\sigma_y}{\sigma_5} = 0,13808 \frac{1,369}{17,83} = 0,01060;$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}_3 - c\bar{x}_4 - d\bar{x}_5 = 9,0652 - 0,01747 \cdot 39,993 + \\ + 0,05525 \cdot 5,9489 - 0,0106 \cdot 48,624 = 8,17979.$$

Рівняння множинної кореляції має вигляд:

$$\delta\% = 8,18 + 0,017\Phi - 0,055\P\% + 0,011N_{\text{гр}}.$$

Коефіцієнт множинної кореляції дорівнює:

$$R = \sqrt{0,1094 \cdot 0,1094 + 0,1569 \cdot 0,13089 + 0,1628 \cdot 0,13808} = \sqrt{0,0549} = 0,2343.$$

Коефіцієнт детермінації дорівнює:

$$D = R^2 = 0,0549.$$

З рівняння множинної кореляції слідує, що найбільший вплив на відносне подовження феритного ковкого чавуну має вміст перліту та число графітних включень. При збільшенні вмісту перліту пластичність ковкого чавуну

зменшується, в той же час, зі зростанням кількості графітних виділень пластичність феритного ковкого чавуну збільшується.

Коефіцієнт детермінації  $D$  свідчить, що на 5,5% зміна пластичності ковкого чавуну обумовлено вмістом перліту, кількістю графітних включень, розміром феритного зерна та 94,5% зміни відносного подовження припадає на долю інших неврахованих факторів.

### **3.1.6. Вплив між різними показниками механічних властивостей ковкого чавуну**

При встановленні залежності між різними показниками механічних властивостей феритного ковкого чавуну були побудовані кореляційні табл. 3.5-3.7 парних залежностей

$$\sigma_B = f(HB); \sigma_B = f(\delta\%); \delta\% = f(HB).$$

Заповнення та обробка кореляційних таблиць виконувалася в порядку, описаному в розділі 3.1.1

### **3.1.7. Вплив між межею міцності та відносним подовженням ковкого чавуну**

Для вивчення залежності між межею міцності та відносним подовженням була побудована кореляційна табл. 3.5 і знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.5).

Для визначення теоретичної лінії регресії були визначені коефіцієнти:

$$a' = 3,7587; b' = -0,3855.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\sigma_B = 39,84 - 0,39\delta\%.$$

Зі збільшенням пластичності ( $\delta\%$ ), міцність ( $\sigma_B$ ) ковкого чавуну знижується.

Таблиця 3.5

Кореляція між межею міцності і відносним подовженням ковкого чавуну

| $y'$         | $x'$                                     | 0       | 1       | 2        | 3         | 4         | 5         | Всього |                |                  |
|--------------|------------------------------------------|---------|---------|----------|-----------|-----------|-----------|--------|----------------|------------------|
|              | $\delta\%$<br>$\sigma_B, \text{кг/мм}^2$ | 7,5-8,5 | 8,5-9,5 | 9,5-10,5 | 10,5-11,5 | 11,5-12,5 | 12,5-13,5 | $m_y$  | $m_y \cdot y'$ | $m_y \cdot y'^2$ |
| 0            | 32,5-33,5                                | 39      | 9       | 12       | 19        | 6         | 3         | 88     | 0              | 0                |
| 1            | 33,5-34,5                                | 39      | 11      | 9        | 13        | 5         | 3         | 80     | 80             | 80               |
| 2            | 34,5-35,5                                | 52      | 22      | 22       | 20        | 12        | 8         | 71     | 142            | 284              |
| 3            | 35,5-36,5                                | 78      | 45      | 42       | 60        | 9         | 6         | 80     | 240            | 720              |
| 4            | 36,5-37,5                                | 200     | 52      | 32       | 32        | 12        | 8         | 84     | 336            | 1344             |
| 5            | 37,5-38,5                                | 100     | 45      | 20       | 25        | 5         | —         | 39     | 195            | 975              |
| 6            | 38,5-39,5                                | 108     | 48      | 24       | 18        | —         | 6         | 34     | 204            | 1224             |
| 7            | 39,5-40,5                                | 539     | 56      | 70       | 35        | 14        | 7         | 103    | 721            | 5047             |
| $m_x$        |                                          | 295     | 84      | 72       | 86        | 26        | 16        | 579    | 1918           | 9674             |
| $m_{xy} y'$  |                                          | 1116    | 279     | 219      | 209       | 57        | 38        | 1918   | —              | —                |
| $\bar{y}'_x$ |                                          | 3,783   | 3,321   | 3,041    | 2,43      | 2,192     | 2,375     | 17,14  | —              | —                |

|                |        |        |        |       |        |        |        |   |   |
|----------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|---|---|
| $\bar{y}_x$    | 36,783 | 36,321 | 36,041 | 35,43 | 35,192 | 35,375 | 215,14 | — | — |
| $m_x x'$       | 0      | 84     | 144    | 258   | 104    | 80     | 670    | — | — |
| $m_x x'^2$     | 0      | 84     | 288    | 774   | 416    | 400    | 1962   | — | — |
| $m_{xy} y' x'$ | 0      | 279    | 438    | 627   | 228    | 190    | 1762   | — | — |

### 3.1.8. Вплив між відносним подовженням і твердістю ковкого чавуну

Для одержання залежності між відносним подовженням і твердістю ковкого чавуну була побудована кореляційна табл 3.6 та знайдена емпірична лінія регресії (рис. 4.6).

Для визначення теоретичної лінії регресії були визначені коефіцієнти:

$$a' = 1,5497; b' = -0,2886.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\delta\% = 14,02 - 0,036HB.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,3012.$$

Перевірка коефіцієнта кореляції за допомогою  $t$ -критерію Стьюдента підтверджує наявність кореляції.

За  $t$ -критерієм Фішера за виразом (2.26) визначаємо адекватність рівняння регресії, якщо  $F_p = 1,63 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ , то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.6

Кореляція між твердістю і відносним подовженням ковкого чавуну

| $y'$         | $x'$              | 0        | 1        | 2        | 3       | 4       | 5       | Всього |                  |                   |
|--------------|-------------------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|--------|------------------|-------------------|
|              | $\delta\%$ / $HB$ | 120-128  | 128-136  | 136-144  | 144-152 | 152-160 | 160-168 | $m_y$  | $m_{y \cdot y'}$ | $m_{y \cdot y^2}$ |
| 0            | 7,5-08,5          | 52       | 55       | 69       | 19      | 25      | 23      | 243    | 0                | 0                 |
| 1            | 8,5-9,5           | 34<br>34 | 25<br>25 | 22<br>22 | 5<br>5  | 4<br>4  | —       | 90     | 90               | 90                |
| 2            | 9,5-10,5          | 56<br>28 | 40<br>20 | 28<br>14 | 8<br>4  | 10<br>5 | —       | 71     | 142              | 284               |
| 3            | 10,5-11,5         | 99<br>33 | 78<br>26 | 39<br>13 | 6<br>2  | —       | —       | 74     | 222              | 666               |
| 4            | 11,5-12,5         | 28<br>7  | 32<br>8  | 16<br>4  | 4<br>1  | —       | —       | 20     | 80               | 320               |
| 5            | 12,5-13,5         | 25<br>5  | 10<br>2  | —        | —       | 5<br>1  | —       | 8      | 40               | 200               |
| $m_x$        |                   | 159      | 136      | 122      | 31      | 35      | 23      | 506    | 574              | 1560              |
| $m_{xy}y'$   |                   | 242      | 185      | 105      | 23      | 19      | -       | 574    | —                | —                 |
| $\bar{y}'_x$ |                   | 1,522    | 1,36     | 0,86     | 0,741   | 0,542   | 0       | 5,02   | —                | —                 |
| $\bar{y}_x$  |                   | 9,522    | 9,36     | 8,86     | 8,741   | 8,542   | 8,0     | 53,02  | —                | —                 |
| $m_x x'$     |                   | 0        | 136      | 244      | 93      | 140     | 115     | 728    | —                | —                 |
| $m_x x'^2$   |                   | 0        | 136      | 488      | 279     | 560     | 575     | 2038   | —                | —                 |
| $m_{xy}y'x'$ |                   | 0        | 185      | 210      | 69      | 76      | -       | 540    | —                | —                 |

### 3.1.9. Одержання рівнянь множинного зв'язку між різними показниками механічних властивостей ковкого чавуну

Щоб одержати загальну картину залежності між різними показниками механічних властивостей феритного ковкого чавуну були одержані рівняння множинної кореляції:

$$\sigma_B = f(\text{HB}; \delta\%) \text{ та } \delta\% = f(\text{HB}; \sigma_B).$$

У випадку одержання рівняння множинного зв'язку з двома факторними ознаками, знаходження коефіцієнтів регресії спрощується. Так для рівняння множинної кореляції

$$x = a + bx_2 + cx_3,$$

коефіцієнти рівняння визначаються із наступних співвідношень:

$$b = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \cdot \frac{r_{12} - r_{23} \cdot r_{13}}{1 - r_{23}^2};$$

$$c = \frac{\sigma_1}{\sigma_3} \cdot \frac{r_{13} - r_{23} \cdot r_{12}}{1 - r_{23}^2};$$

$$a = \bar{x} - b\bar{x}_2 - c\bar{x}_3.$$

Визначаємо дисперсії та середнє значення межі міцності ( $\sigma_B$ ); відносного подовження ( $\delta\%$ ) і твердості (HB), які позначимо:

$$z = \sigma_B; y = \delta\%; x_1 = \text{HB}.$$

з табл. 3.4

$$\bar{z} = \frac{1918}{579} + 33 = 36,3126;$$

$$\bar{y} = \frac{670}{579} + 8,0 = 9,1572;$$

з табл. 3.5

$$\bar{x}_1 = \frac{309}{518} \cdot 8 + 132 = 136,7720;$$

$$\sigma_z^2 = \left[ \frac{2281}{518} - \left( \frac{815}{518} \right)^2 \right] \cdot 4 = 7,7128;$$

$$\sigma_z = 2,78;$$

з табл. 3.6

$$\sigma_y^2 = \left[ \frac{1560}{506} - \left( \frac{574}{506} \right)^2 \right] = 1,7964;$$

$$\sigma_y = 1,34;$$

$$\sigma_{x_1}^2 = \left[ \frac{2038}{506} - \left( \frac{728}{506} \right)^2 \right] \cdot 64 = 125,44;$$

$$\sigma_{x_1} = 11,2.$$

Коефіцієнт множинної кореляції у випадку рівняння виду

$$x_1 = a + bx_2 + cx_3,$$

визначається із наступного співвідношення:

$$R = \sqrt{\frac{r_{12}^2 + r_{13}^2 - 2 \cdot r_{12} \cdot r_{13} \cdot r_{23}}{1 - r_{23}^2}}.$$

### **3.1.10. Одержання рівняння множинного зв'язку відносного подовження від міцності і твердості ковкого чавуну**

Використавши прийняті позначення, рівняння множинного зв'язку має вигляд:

$$y = a + bz + cx_1.$$

Визначаємо коефіцієнти регресії множинного зв'язку:

$$b = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} \cdot \left[ \frac{r_{yz} - r_{yx_1} \cdot r_{zx_1}}{1 - r_{zx_1}^2} \right] = \frac{1,34}{11,2} \left[ \frac{-0,3012 + 0,6773 \cdot 0,3012}{1 - 0,6773^2} \right] = -0,0395;$$

$$c = \frac{\sigma_y}{\sigma_{x_1}} \cdot \left[ \frac{r_{x_1y} - r_{zy} \cdot r_{zx_1}}{1 - r_{zx_1}^2} \right] = \frac{1,34}{11,2} \left[ \frac{-0,3012 + 0,2305 \cdot 0,6773}{1 - 0,6773^2} \right] = -0,0537;;$$

$$a = \bar{y} - b\bar{z} - c\bar{x}_1 = 9,1572 + 0,0395 \cdot 36,3126 + 0,0537 \cdot 136,772 = 17,9361.$$

Рівняння множинної кореляції має вигляд:

$$\delta\% = 17,94 - 0,04\sigma_B - 0,054HB.$$

Визначаємо коефіцієнт множинної кореляції:

$$R = \sqrt{\frac{r_{yz}^2 + r_{yx_1}^2 - 2r_{yz} \cdot r_{yx_1} \cdot r_{zx_1}}{1 - r_{zx_1}^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{0,2305^2 + 0,3012^2 - 2 \cdot 0,6773 \cdot 0,2305 \cdot 0,3012}{1 - 0,6773^2}} = 0,391.$$

Визначаємо коефіцієнт детермінації:

$$D = R^2 = 0,4594.$$

Із рівняння множинної кореляції слідує, що найбільший вплив на пластичність феритного ковкого чавуну має твердість. Зі збільшенням як міцності, так і твердості, пластичність феритного ковкого чавуну зменшується.

Коефіцієнт детермінації  $D$  свідчить, що на 15% зміна пластичності феритного ковкого чавуну обумовлюється зміною твердості та міцності.

### **3.1.11. Номограма для визначення за відомою твердістю значень міцності і пластичності ковкого чавуну**

З метою застосування для неруйнівного контролю механічних властивостей ковкого чавуну була побудована номограма для визначення за відомою твердістю значень межі міцності та відносного подовження на підставі одержаних раніше кореляційних залежностей:  $\sigma_B = f(HB)$  та  $\delta\% = f(HB)$ .

## РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

За розрахунковими даними у середовищі Microsoft Excel, будуємо кореляційні поля, емпіричні та теоретичні лінії регресії для досліджуваних функцій. В програмі Microsoft Office Excel в режимі кореляції та регресії MS Excel можна разом проводити як дисперсійний, кореляційний, а також і регресійний аналіз з оцінкою значущості коефіцієнтів відповідно отриманих рівнянь регресії [20, 21].

При дослідженні впливу структури ковкого чавуну на механічні властивості доцільно також використовувати пакет програми MathCAD [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 відносного подовження ковкого чавуну від структури, приведені на рис. 4.1–4.7.

### 4.1. Залежність числа виділень графіту на відносне подовження ковкого чавуну

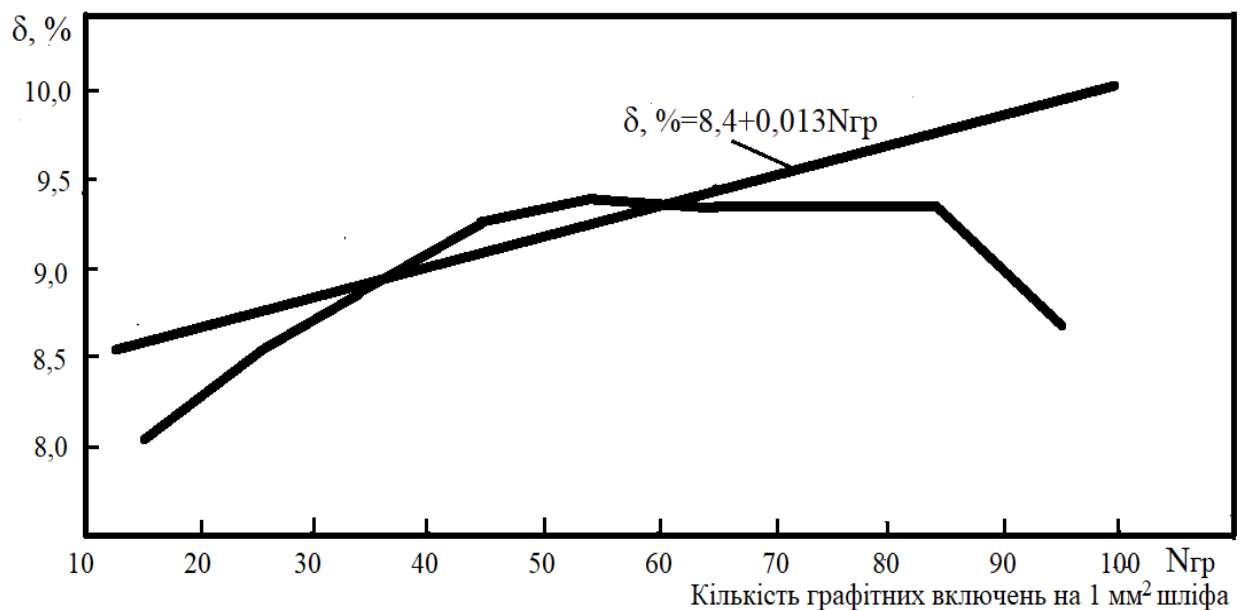


Рисунок 4.1 – Залежність кількості включень графіту на відносне подовження ковкого чавуну

З рис. 4.1 видно, що при числі графітних включень менше 50 штук на 1 мм<sup>2</sup> шліфа зі збільшенням числа графітних включень збільшується і відносне подовження. При збільшенні числа графітних включень більше 50 штук на 1 мм<sup>2</sup> шліфа відносне подовження суттєво не змінюється.

#### 4.2. Залежність розміру зерна фериту на відносне подовження ковкого зерна

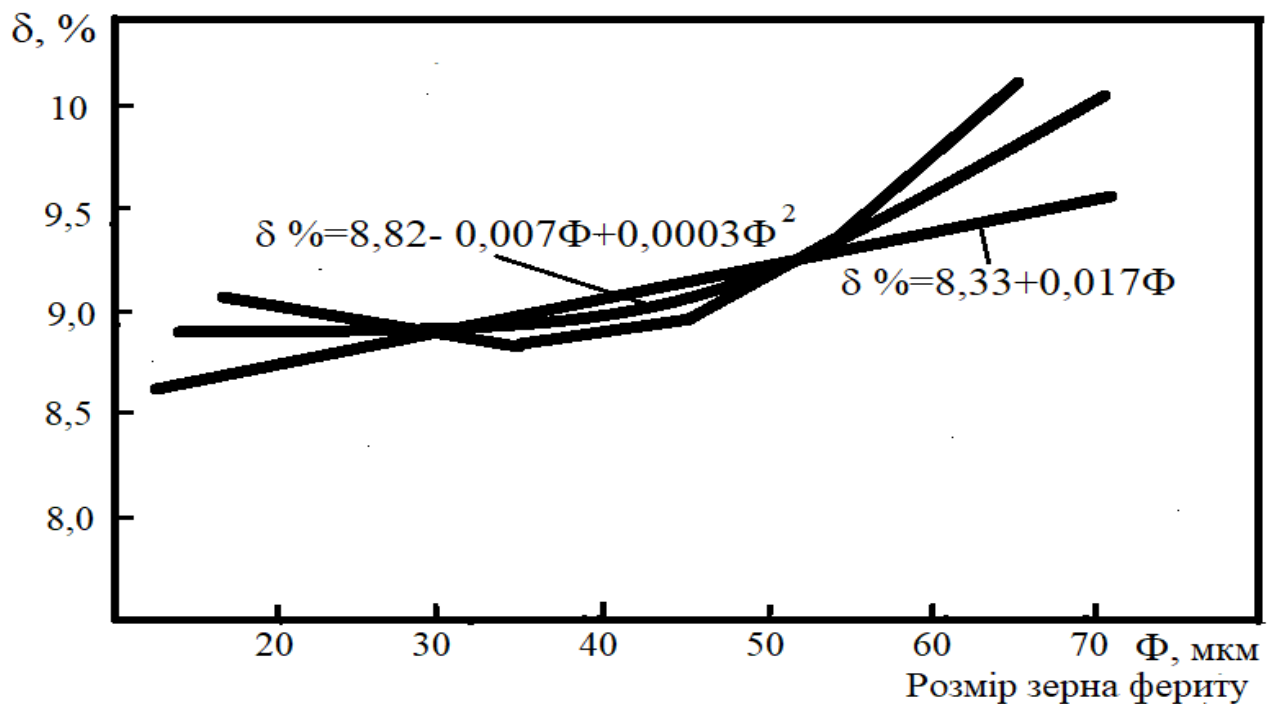


Рисунок 4.2 – Вплив розміру зерна фериту на відносне подовження ковкого зерна

З рис. 4.2 видно, що емпірична лінія регресії має форму, більш наближену до параболічної, ніж до прямолінійної.

З рис. 4.2 видно, що в межах досліджуваної вибірки при розмірі феритного зерна до 45 мкм, зі зростанням феритного зерна відносне подовження суттєво не змінюється. При зростанні розміру феритного зерна більше 45 мкм, відносне подовження феритного ковкого чавуну починає збільшуватися.

#### 4.3. Вплив вмісту перліту на відносне подовження ковкого чавуну

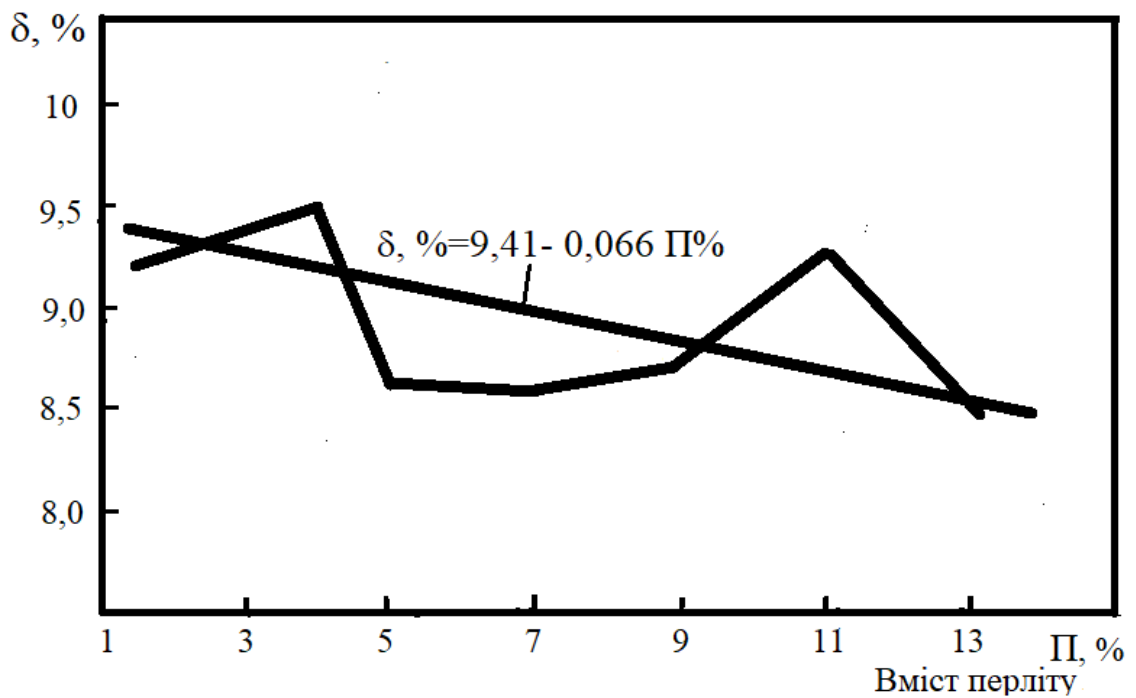


Рисунок 4.3 – Вплив вмісту перліту на відносне подовження ковкого чавуну

З рис. 4.3 слідує, що в межах досліджуваної вибірки з підвищенням вмісту перліту у ковкому чавуні відносне подовження зменшується.

#### 4.4. Залежність середнього діаметра графітних включень на відносне подовження ковкого чавуну

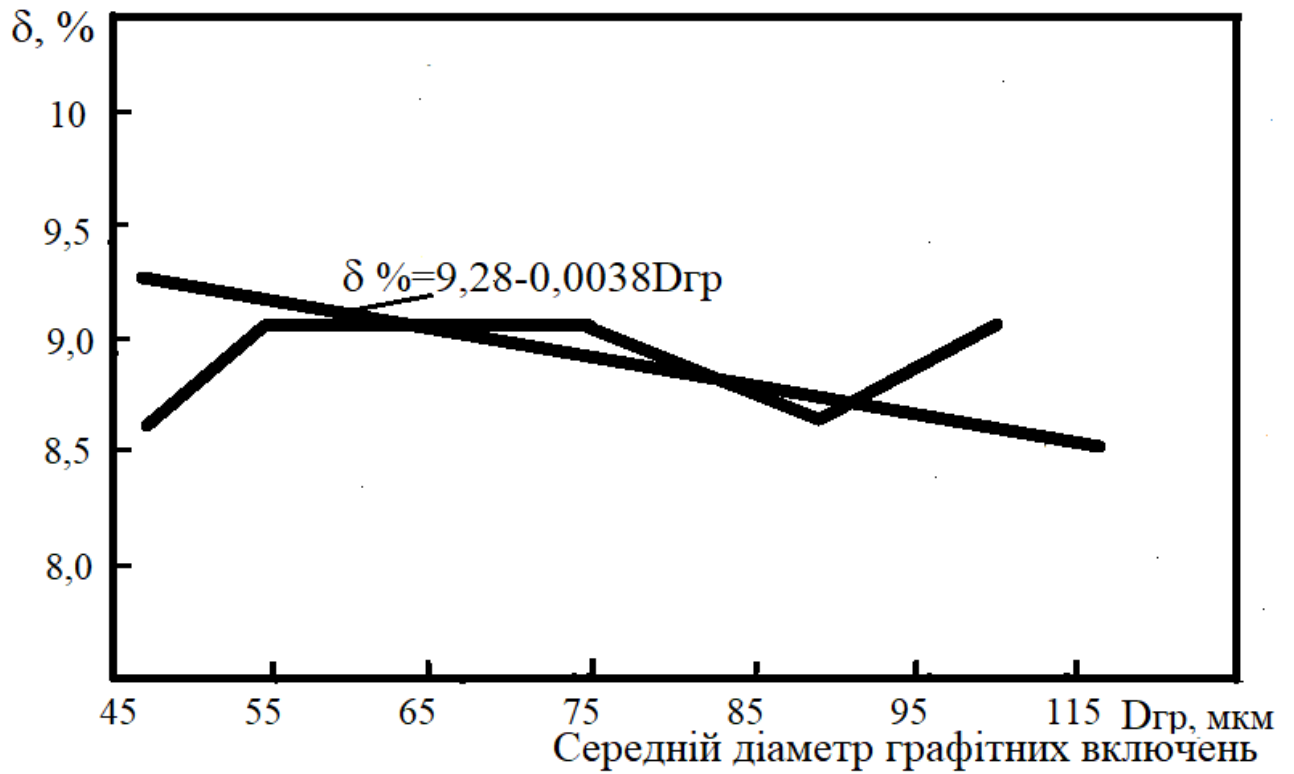


Рисунок 4.4 – Вплив середнього діаметра графітних включень  
на відносне подовження ковкого чавуну

З рис. 4.4 видно, що зміна розмірів графітних включень в межах досліджуваної вибірки не призводить до суттєвих змін відносного подовження ковкого чавуну.

#### 4.5. Залежність межі міцності ковкого чавуну від відносного подовження

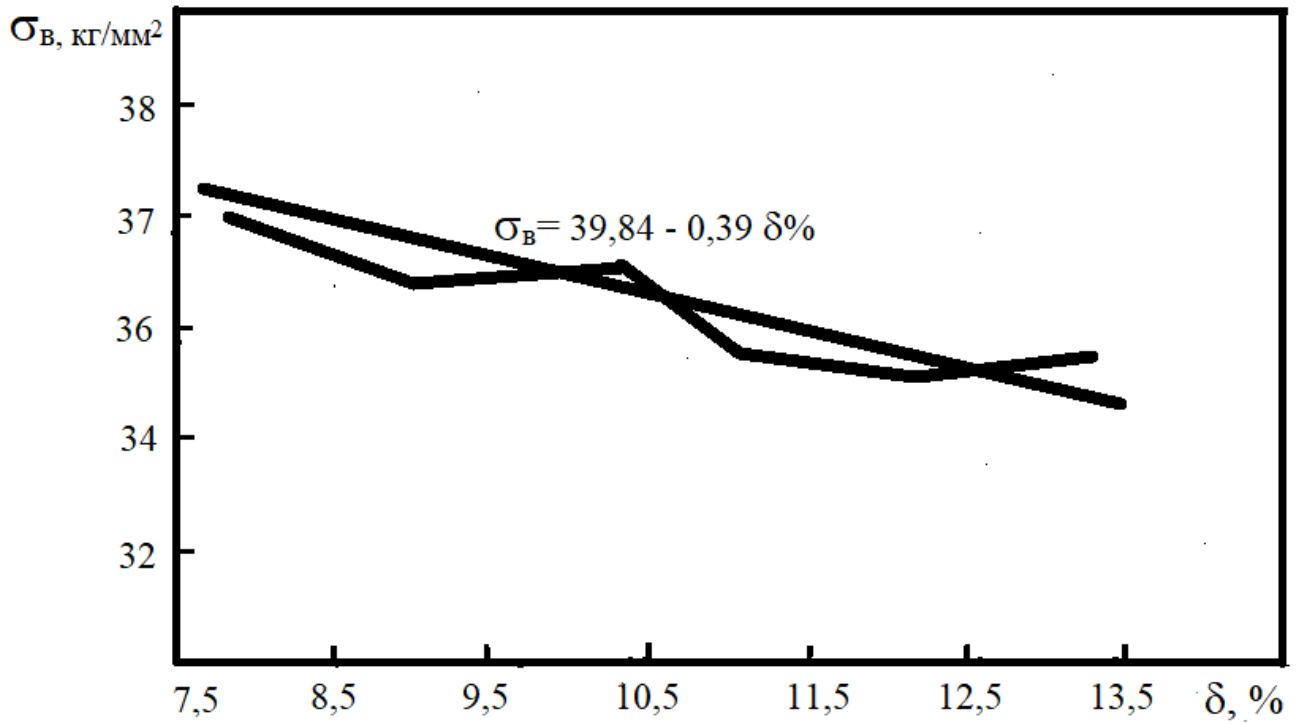


Рисунок 4.5 – Залежність межі міцності феритного ковкого чавуну  
від відносного подовження

З рис. 4.5 видно, що між межею міцності ковкого чавуну та відносним подовженням існує тісний кореляційний зв'язок, про що свідчить і високе значення коефіцієнта кореляції ( $r = -0,2305$ ).

Зі збільшенням пластичності ( $\delta\%$ ), міцність ( $\sigma_B$ ) ковкого чавуну знижується.

#### 4.6. Залежність між відносним подовженням ковкого чавуну і твердістю

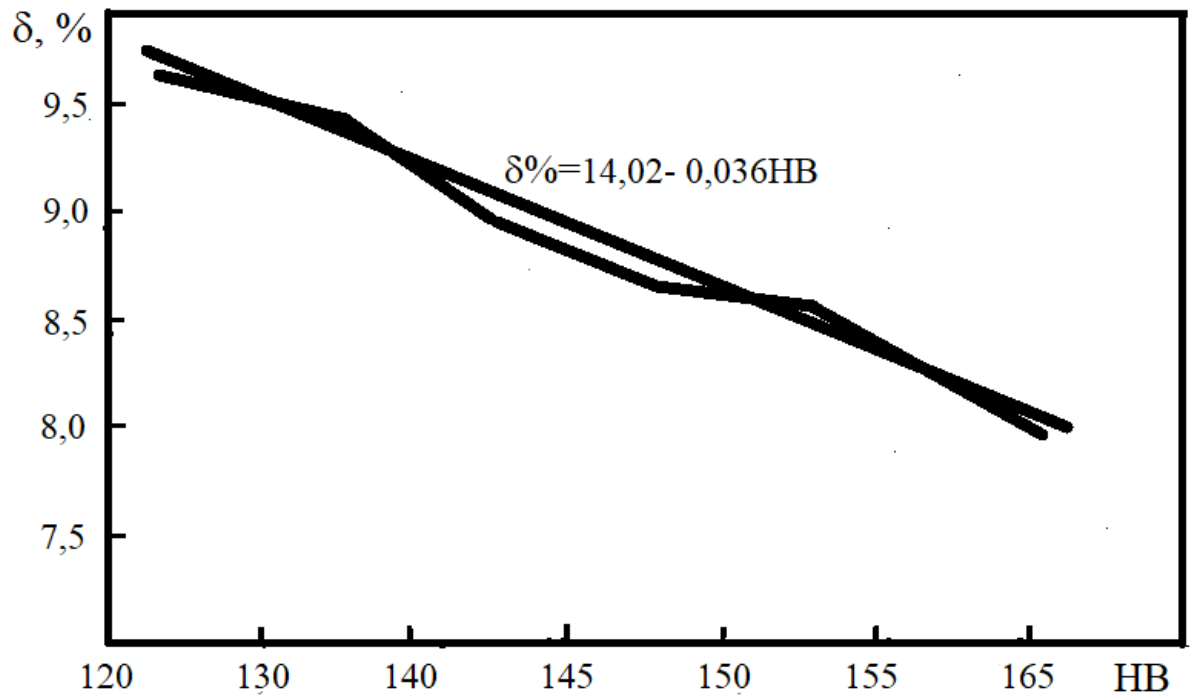


Рисунок 4.6 – Залежність між відносним подовженням ковкого чавуну  
і твердістю

З рис. 4.6 видно, що між відносним подовженням ковкого чавуну і твердістю існує тісний лінійний зворотній кореляційний зв'язок, про що свідчить високе значення коефіцієнта кореляції ( $r = 0,3012$ ).

#### 4.7. Побудова номограми для визначення за відомою твердістю значень міцності і пластичності ковкого чавуну

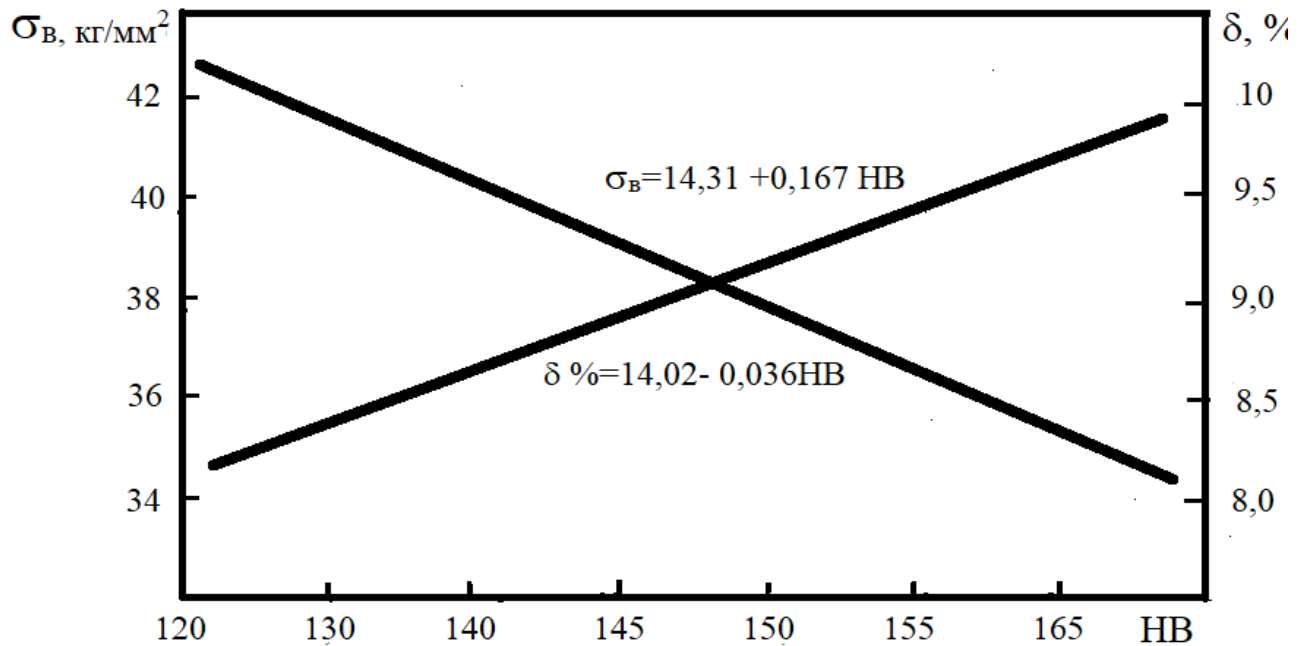


Рисунок 4.7 – Номограма для визначення значень межі міцності і відносного подовження ковкого чавуну в залежності від його твердості

Ця номограма була одержана в результаті побудови на одному графіку двох теоретичних ліній регресії  $\sigma_B = f(\text{HB})$  та  $\delta\% = f(\text{HB})$  із загальною віссю ординат, на якій відкладалися значення твердості.

## ВИСНОВКИ

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

З'ясовано, що при числі графітних включень менше 50 штук на 1 мм<sup>2</sup> шлифа зі збільшенням числа графітних включень збільшується і відносне подовження. З підвищенням вмісту перліту у ковкому чавуні відносне подовження зменшується. При розмірі феритного зерна до 45 мкм, зі зростанням феритного зерна відносне подовження суттєво не змінюється. При зростанні розміру феритного зерна більше 45 мкм, відносне подовження феритного ковкого чавуну починає збільшуватися.

Показано також, що зі збільшенням пластичності ( $\delta\%$ ), міцність ( $\sigma_B$ ) феритного ковкого чавуну знижується.

При дослідженні встановлено, що між відносним подовженням ковкого чавуну і твердістю існує тісний лінійний зворотній кореляційний зв'язок, про що свідчить високе значення коефіцієнта кореляції ( $r = 0,3012$ ).

Найбільш суттєвий вплив на механічні властивості ковкого чавуну має перліт. Змінюючи тривалість другої стадії графітизації і, тим самим, регулюючи вміст перліту, ми можемо одержати ковкий чавун з бажаним співвідношенням міцності та пластичності.

Для одержання ковкого чавуну з підвищеними механічними властивостями необхідно, щоб склад чавуну відповідав 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