

Центральноукраїнський національний технічний університет
Центр заочної та дистанційної освіти
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:
Вплив структури високоміцного чавуну на його пластичність

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ПМ-24Мз-1
спеціальності 131
«Прикладна механіка»
_____ Олександр ЯЦЕЧКО
« ____ » _____ 20 ____ р.

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

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

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет: центр заочної та дистанційної освіти

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
Яцечка Олександра Юрійовича**

1. Тема роботи: Вплив структури високоміцного чавуну на його пластичність.

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 пластичність високоміцного чавуну.

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

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Опрацювання навчальної та наукової літератури		
2	Проведення наукових досліджень, обробка фактичного матеріалу		

3	Написання першого варіанта тексту, подання його на ознайомлення 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

_____ Олександр ЯЦЕЧКО

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТОВАНІСТЬ ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ	11
1.1. Вивчення впливу структури високоміцного чавуну на його пластичність	11
1.2. Вивчення впливу діаметра графітних включень та величини зерна на пластичність високоміцного чавуну	12
1.3. Вивчення впливу числа виділень графіту на пластичність високоміцного чавуну	13
1.4. Вивчення впливу між різними показниками механічних властивостей високоміцного 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 високоміцного чавуну на його пластичність.....	15
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВЛИВУ СТРУКТУРИ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ НА ЙОГО ВІДНОСНЕ ПОДОВЖЕННЯ	22
3.1. Вивчення впливу структури високоміцного чавуну на пластичність (оброблення даних методом кореляції залежності пластичності високоміцного чавуну від структури).....	22
3.1.1. Вплив числа виділень графіту на пластичність високоміцного чавуну.....	22
3.1.2. Вплив вмісту перліту на пластичність високоміцного чавуну.....	23
3.1.3. Вплив розміру феритного зерна на пластичність високоміцного чавуну.....	26
3.1.4. Вплив середнього діаметра графітних включень на пластичність високоміцного чавуну	30

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

АНОТАЦІЯ

Ящечко О.Ю. Вплив структури на пластичність високоміцного чавуну, спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2025. 54с. Матеріали ілюстрації 10 іл.

Метою дослідження є вивчення впливу структури на пластичність високоміцного чавуну. Дослідження проводились звісно методами математичної статистики та оцінки кореляційним аналізом в середовищі Microsoft Office Excel та MathCAD.

В роботі одержали дані з метою встановлення достовірності досліджуваних залежностей пластичності від показників структури високоміцного чавуну.

Проведені дослідження по впливу діаметра графітних включень на пластичність високоміцного чавуну; кількості виділинь графіту на пластичність високоміцного чавуну; впливу розміру феритного зерна на пластичність високоміцного чавуну; впливу міцності високоміцного чавуну на пластичність. Отримано рівняння множинної кореляції звісно залежності пластичності від структури високоміцного чавуну.

З'ясовано, що якщо при числі графітних включень менше 55 штук на 1 мм² шліфа, то, певна річ, із збільшенням числа графітних включень, пластичність збільшується. При підвищенні вмісту перліту у високоміцному чавуні пластичність буде зменшуватися. При збільшенні розміру феритного зерна більше 45 мкм, звісно пластичність високоміцного чавуну буде збільшуватися.

Показано, що при збільшенні пластичності ($\delta^0\%$), міцність (σ_B) високоміцного чавуну безумовно знижується.

Встановлено, що між пластичністю високоміцного чавуну та твердістю існує звісно тісний лінійний зворотній кореляційний зв'язок, відповідно про це свідчить високе значення коефіцієнта кореляції ($r = 0,3183$).

високоміцний чавун, пластичність, кореляція, рівняння регресії

ABSTRACT

Yatsechko O.Yu. The influence of structure on the plasticity of high-strength cast iron, specialty 131 "Applied Mechanics", OPP - "Applied Mechanics", Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2025. 54p. Illustration materials 10 ill.

The purpose of the research is to study the influence of structure on the plasticity of high-strength cast iron. The research was carried out, of course, using methods of mathematical statistics and evaluation by correlation analysis in the Microsoft Office Excel and MathCAD environments.

The work obtained data in order to establish the reliability of the studied dependences of plasticity on the structural parameters of high-strength cast iron. Research was conducted on the influence of the diameter of graphite inclusions on the plasticity of high-strength cast iron; the number of graphite precipitates on the plasticity of high-strength cast iron; the influence of ferrite grain size on the plasticity of high-strength cast iron; the influence of the strength of high-strength cast iron on plasticity. The equation of multiple correlation of the dependence of plasticity on the structure of high-strength cast iron was obtained.

It was found that when the number of graphite inclusions is less than 55 pieces per 1 mm² of the cut, then with an increase in the number of graphite inclusions, plasticity increases. With an increase in the pearlite content in high-strength cast iron, plasticity will decrease. With an increase in the size of the ferrite grain to more than 45 microns, the plasticity of high-strength cast iron will increase.

It is shown that with an increase in plasticity (δ %), the strength (σ_B) of high-strength cast iron naturally decreases.

It was established that there is a close linear inverse correlation between the plasticity of high-strength cast iron and hardness, as evidenced by the high value of the correlation coefficient ($r = 0.3183$).

high-strength cast iron, plasticity, correlation, regression equation

ВСТУП

Актуальність теми

Високоміцний чавун, як конструкційний матеріал, за своїми добрими фізичними, механічними та технологічними властивостями наразі має суттєве використання в багатьох галузях виробництва. Перевага високоміцного чавуну перед іншим сплавами полягає в однорідності властивостей звісно по перерізу вилівка, відсутність при цьому напружень, а також позитивними механічними властивостями, завдяки яким цей сплав має широке застосування.

У високоміцному чавуні твердість відповідно залежить від металевої матриці, звісно від графіту, отже суттєвий вплив має його форма. Міцність та пластичність високоміцного чавуну залежать від металевої матриці, графіту та кількості його.

Найбільша міцність отримується при відповідному вмісті перліту та звісно кулястого графіту, а найбільшу пластичність можливо отримати при переважаючій структурі фериту, а також компактного графіту.

Отже проведення дослідження високоміцного чавуну, які будуть направлені на покращення якості матеріалу, а також при цьому зниження вартості виливків із високоміцного чавуну, є актуальною задачею.

Застосування високоміцного чавуну для виробництва виливків в машинобудівній промисловості буде впливати на підвищення як зносостійкості, так і експлуатаційних властивостей деталей – це стосується виготовлення таких деталей машин та механізмів, звісно як корпуси коробок передач, потім поршневі кільця, також шестерні, колінчасті вали і блоки циліндрів та різні кріплення.

Дослідження впливу структури високоміцного чавуну на пластичність наразі є актуальним завданням, яке буде спрямовано на підвищення як міцності так і твердості високоміцного чавуну в залежності від структури.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є вивчення впливу структури на пластичність високоміцного чавуну.

Та вирішення таких задач:

- дослідження впливу діаметра графітних включень на пластичність високоміцного чавуну;
- дослідити вплив кількості виділинь графіту на пластичність високоміцного чавуну;
- дослідження впливу вмісту перліту на пластичність високоміцного чавуну;
- дослідити вплив розміру феритного зерна на пластичність високоміцного чавуну;
- дослідження впливу міцності високоміцного чавуну на пластичність;
- дослідити вплив між пластичністю і твердістю високоміцного чавуну;
- отримання рівняння множинної кореляції залежності пластичності від структури високоміцного чавуну.

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є високоміцний чавун. Предметом дослідження є вивчення впливу структури на пластичність високоміцного чавуну.

Наукова новизна одержаних результатів

Вперше проведено вивчення впливу структури на відносне подовження ковкого чавуну для такого складу: $C = 3,2-3,6 \%$; $Si = 2,0-2,5\%$; $Mn = 0,25-0,60 \%$; до $0,02\% S$.

З'ясовано, що істотний вплив з структурних складових на пластичність високоміцного чавуну має звісно вміст перліту. Позитивний вплив на пластичність

тичність високоміцного чавуну має технологія плавки, модифікування, а також зв'язно структура чавуну.

Практичне значення отриманих результатів

Провівши дослідження впливу структури високоміцного чавуну на його пластичність показує, щоб досягти відповідних властивостей чавуну для застосування в різних галузях виробництва, треба неодмінно регулювати та коригувати його структуру. Основний вплив на пластичність високоміцного чавуну має форма графітових включень, а також зв'язно їх розмір.

Апробація результатів роботи

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

РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТОВАНІСТЬ ФОРМУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ

1.1. Вивчення впливу структури високоміцного чавуну на пластичність

У високоміцному чавуні його структурні складові будуть мати відповідно різні механічні властивості, отже, зі зміною їх кількості складових, певна річ, буде змінюватись і співвідношення між механічними властивостями високоміцного чавуну, це наведено в табл. 1.1 [1-8].

Таблиця 1.1

Структурні складові високоміцного чавуну та їх властивості

Структурна складова	Механічні властивості	
	σ_B , кг/мм ²	δ , %
Перліт	75,0	7,0
Феріт	45,0	22,0

Аналізуючи табл. 1.1 підтверджується, що завдяки підбору співвідношення між кількістю перліту і фериту можна отримати високоміцний чавун з звісно оптимальним співвідношенням міцності та пластичності. Міцність високоміцного чавуну звісно підвищується з збільшенням складу С, а це, в свою чергу, впливає на зниження пластичних властивостей чавуну.

Значний вплив на фізико-механічні властивості високоміцного чавуну має також щільність литва, вагомим фактором є авжеж графітова фаза, яка впливає на щільність звісно самої металевої матриці. При зменшенні розміру графітних включень буде збільшуватись як міцність, так і пластичність, але це стосується феритного високоміцного чавуну, він цим і буде відрізнятися від інших чавунів та сплавів [8-10].

1.2. Вивчення впливу діаметра графітних включень та величини зерна на пластичність високоміцного чавуну

Важливий вплив на міцність високоміцного чавуну має форма графітного включення (рис. 1. 1).

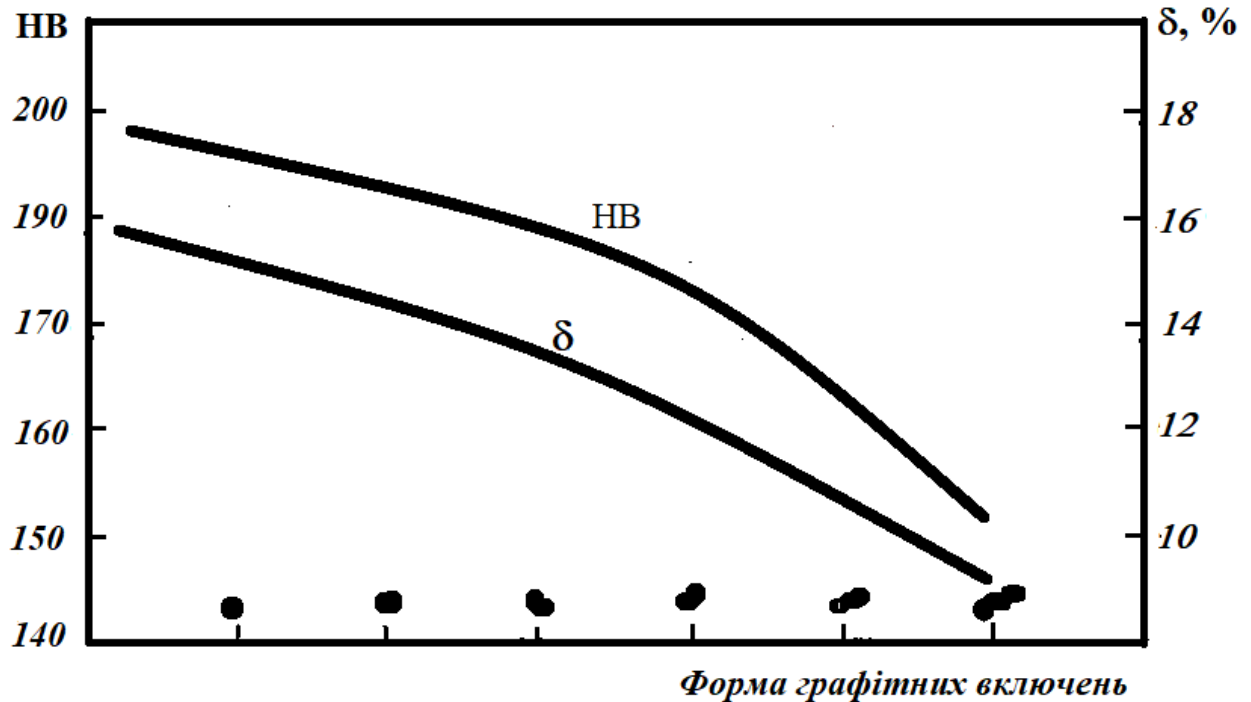


Рис. 1.1. Вплив форми графітових включень на міцність високоміцного чавуну

Значно знижується пластичність високоміцного чавуну при наближенні звісно форми графітних включень до пластинчастих (рис. 1.1). Величина зерна механічної матриці суттєво має вплив на механічні характеристики високоміцного чавуну, це приведено в табл. 1.2 [10-14].

Таблиця 1.2

Вплив величини зерна на міцність чистого заліза

Середній діаметр зерна фериту, мм	σ_B , кг/мм ²	δ , %	Середній діаметр зерна, мм	σ_B , кг/мм ²	δ , %
11,2	19,8	30,3	0,4	29,2	41,3
8,3	38,4	35,3	0,18	34,2	49,1
3,2	47,1	42,5	0,14	40,4	55,2

1.3. Вивчення впливу числа виділень графіту на пластичність високоміцного чавуну

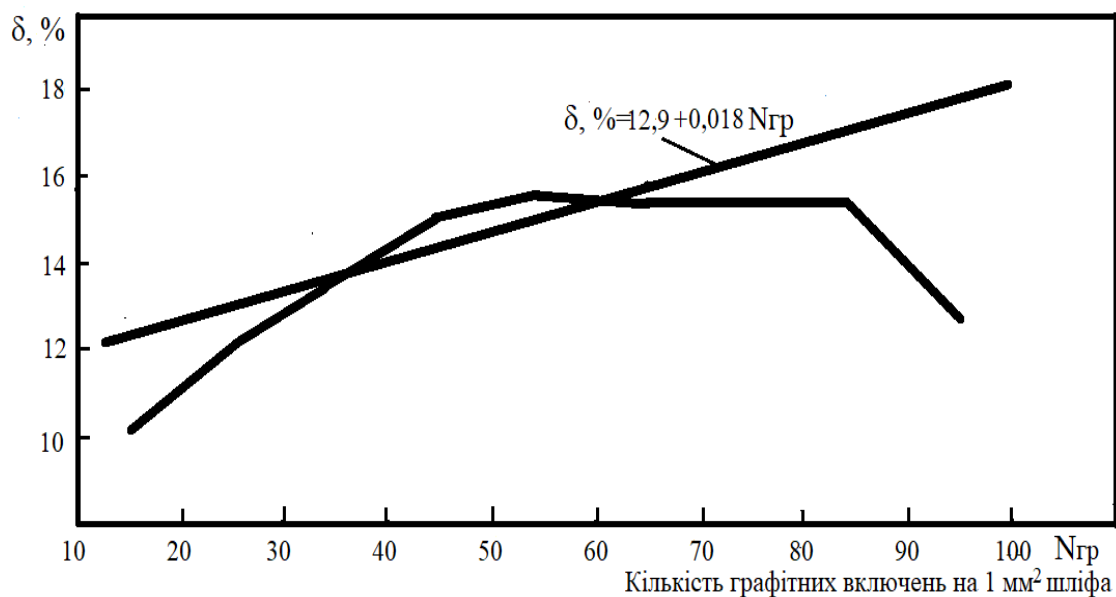


Рис. 1.2. Залежність кількості включень графіту на пластичність високоміцного чавуну

З рис. 1.2 видно, коли число графітних включень менше 55 штук на 1 мм² шліфа, з збільшенням звісно числа графітних включень збільшується пластичність.

1.4. Вивчення впливу між різними показниками механічних властивостей високоміцного чавуну

Залежності між міцністю і твердістю, а також пластичністю, приведемо, спираючись на дані інформаційних джерел та представимо в табл. 1.3 [14].

Таблиця 1.3

Залежності між міцністю, твердістю та пластичністю чавунів

Вид чавуну	Залежність
Феритний високоміцний чавун	$\sigma_B = 17 + 0,23HB$
	$\delta \% = 0,45 + 0,27HB$
Чавун з кулястим графітом	$\sigma_B = 77,3 - 0,087HB$
	$\delta \% = 10,7 - 0,024HB$

Приведені залежності такого виду є специфічними, наприклад, для відповідних умов виробництва та використання у необхідних зонах при зміні показників механічних властивостей чавуну (табл. 1.3) [8-14].

Зміна залежності міцності від пластичності високоміцного чавуну наведена на рис. 1.3.

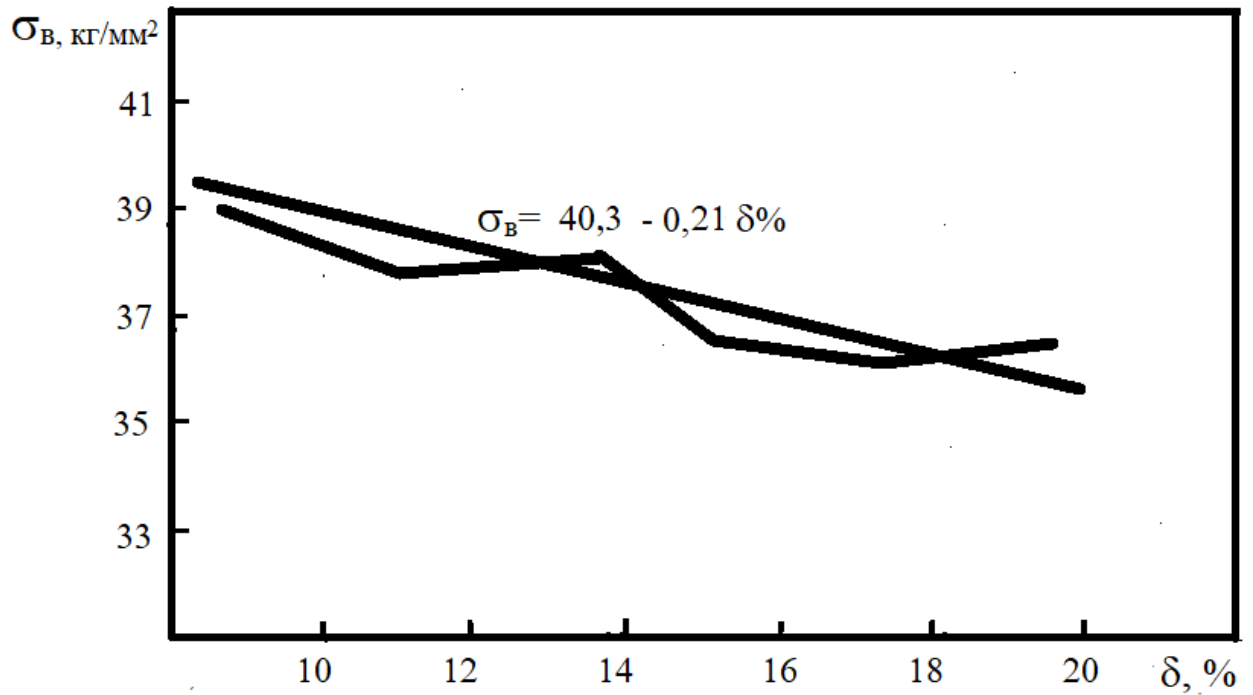


Рис. 1.3. Залежність міцності від пластичності високоміцного чавуну

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом проведення дослідження є високоміцний чавун з хімічним складом згідно ДСТУ 3925-99 $C = 3,2-3,6 \%$; $Si = 2,0-2,5\%$; $Mn = 0,25-0,60 \%$; до $0,02\% S$ [15], який широко використовується в промисловості. *Предметом дослідження* є вивчення впливу структури на пластичність високоміцного чавуну.

Високоміцний чавун з кулястою формою графіту отримують при введенні від $0,03...0,07 \%$ магнію в рідкий метал або при введенні магнієвих лігатур з нікелем або феросиліцієм.

2.2. Методика і матеріал дослідження

При дослідженні пластичності високоміцного чавуну відливаються звісно зразки згідно ДСТУ 3925-99. Випробування пластичності отриманих зразків з високоміцного чавуну виконується, використовуючи ДСТУ 3925-99 [15]. Випробовування підготовлених зразків на пластичність високоміцного чавуну виконувалися звісно у випробувальній лабораторії, а результати записувалися у протоколи [15].

2.3. Методика для отримання залежностей впливу структури високоміцного чавуну на пластичність

Аналіз властивостей високоміцного чавуну в залежності від структури – звісно пластичності потрібно для підвищення якості високоміцного чавуну, та, певна річ, вдосконалення ефективних технологій процесу його виготовлення.

Вплив структури на пластичність високоміцного чавуну виконувався, використовуючи методи теорії кореляції і регресійний аналіз [16- 20].

Апроксимуючу функцію наводимо поліномом

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

Залежність пластичності високоміцного чавуну від його структури можна знаходити, використовуючи такі функції [15, 16, 20]:

$$\text{– лінійна} \quad y = b_1x + b_0; \quad (2.2)$$

$$\text{– поліноміальна другого ступеня} \quad y = b_2x^2 + b_1x + b_0; \quad (2.3)$$

При застосуванні математичних методів побудови моделей – це кореляційний та регресійний аналіз для дослідження впливу структури на пластичність високоміцного чавуну, з'ясовували величини математичних моделей (регресійних рівнянь) та перевіряли їх на адекватність [16-21].

Отже, побудова регресійної моделі потрібна при визначенні функції $y(b, x)$, а функціонал нев'язки для неї 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, тобто функція для апроксимації залежності звисно в i -й точці; y_i – значення емпіричної залежності; b – вектор параметрів; x – вектор незалежних змінних.

Рівняння регресії:

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

де b_0, b_1 невідомі коефіцієнти.

Рівняння регресії представимо таким чином

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1x)^2 \rightarrow \min. \quad (2.6)$$

Розрахунок коефіцієнтів b_0, b_1 виконуємо за такими виразами.

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

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

Також між вхідними та вихідними параметрами залежність можна за-
давати у вигляді наступного 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 звісно треба визначати з системи рів-
нянь при врахуванні методу єдиного ділення Гауса та знаходження коефіці-
єнтів 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, врахо-
вуючи коефіцієнт кореляційного відношення Пірсона [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 вибірці; $i = 1, 2, \dots, 100$ – номер спосте-
режень; x_i – значення вмісту елемента у високоміщному чавуні в i -ому спо-
стереженні; \bar{x} , \bar{y} – 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 – показник значення міцності високоміцного чавуну;

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

b – коефіцієнт регресії при параметрі x в рівнянні регресії можна визначити при застосуванні МНК [16-21]:

σ_x^2 – дисперсія параметра x :

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

σ_y^2 – дисперсія параметра y :

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

Кореляційне відношення для нелінійних залежностей можна визначити за таким рівнянням

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

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

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

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

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

За відповідними методиками розглядаємо та визначаємо статистичну значущість коефіцієнтів парної кореляції [16,17].

Перевірка залежності між величинами x і y відповідно 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 ; σ_x, σ_y – середньоквадратичні відхилення [15-19]

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

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

При $r = 1$ є наявність лінійного функціонального зв'язку звісно між відповідними величинами x і y , а при $r > 0,5$ маємо вже помітний лінійний зв'язок між цими величинами x і y .

Для оцінювання величин b_1, b_0 у рівнянні (2.5) звісно можна застосувати метод найменших квадратів. Найдосконаліші значення параметрів b_1, b_0 будуть такі, для яких звісно сума квадратів відхилень емпіричних значень y_i від розрахункових значень y_p має мінімальне значення [16-21].

Виконаємо перевірку коефіцієнтів регресії на значущість – визначаємо середньоквадратичні 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 .

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

Застосовуємо критерій Стьюдента для перевірки зв'язності коефіцієнтів регресії на значущість [16-21].

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

Табличне значення t -критерія Стьюдента відшукуємо для зв'язності чисел ступенів вільності, наприклад, $f = N - 1$, а також і рівня значимості, $\alpha = 0,05$. При порівнянні теоретичного розрахованого значення t -критерія Стьюдента з табличним значенням встановлюємо значимі коефіцієнти чи ні.

При $t_p \geq t_{\text{табл.}}$, ці коефіцієнти b_i будуть зв'язні статистично значимими, а от при $t_p \leq t_{\text{табл.}}$, коефіцієнти будуть вже статистично не значимі.

Адекватність математичної моделі, тобто рівняння регресії [16-21], відшукуємо за критерієм Фішера

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

Наприклад, рівняння регресії (2.2), (2.3), підставляємо у (2.26), а звідси значення коефіцієнтів регресії розраховуємо при використанні даних таблиць обробки.

F_p – критерій Фішера звідси величина, яка вказує на розподіл Фішера з такими ступенями вільності, $f_1 = n - 1$, $f_2 = n - k$. Потім за таблицями для критерію Фішера звідси при рівні значущості $\alpha = 0,05$ відшукуємо $F_{\text{табл.}}$. Якщо, при $F_p \geq F_{\text{табл.}}$ маємо неадекватне рівняння регресії, а от вже при $F_p \leq F_{\text{табл.}}$ рівняння регресії неодмінно є адекватним.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ВИСОКОМІЦНОГО ЧАВУНУ НА ПЛАСТИЧНІСТЬ

3.1. Вивчення впливу структури високоміцного чавуну на пластичність (оброблення даних методом кореляції залежності пластичності високоміцного чавуну від структури)

При вивченні впливу структури високоміцного чавуну на пластичність були побудовані кореляційні табл. 3.1-3.4 для парних залежностей

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

3.1.1. Вплив числа виділень графіту на пластичність високоміцного чавуну

Для вивчення впливу кількості виділень графіту на пластичність високоміцного чавуну сформована кореляційна табл. 3.1 та відшукана емпірична лінія регресії (рис. 4.1).

Для відшукування теоретичної лінії регресії знайшли коефіцієнти:

$$a' = 0,9887; \quad b' = 0,1415.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії має вигляд:

$$\delta\% = 12,9 + 0,018N_{гр}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1839.$$

Перевіряємо наявність кореляції за допомогою t -критерію Стьюдента:

$$t_{роз} = \frac{0,1839}{\sqrt{1 - 0,1839^2}} \cdot \sqrt{457 - 2} = 3,99.$$

Якщо $t_{роз} > t_{табл} = 1,96$, то лінійна кореляція зв'язно між факторами, які досліджуємо, існує.

За t -критерієм Фішера (2.26) відшукуємо адекватність рівняння регресії, маємо $F_p = 1,38 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, звідси рівняння регресії є адекватне.

Якщо число графітних включень буде більше 85 штук на 1 мм^2 шліфа, то спостерігаємо зниження пластичності високоміцного чавуну.

3.1.2. Вплив вмісту перліту на пластичність високоміцного чавуну

Для вивчення впливу вмісту перліту на пластичність високоміцного чавуну формуємо кореляційну табл. 3.2 та знаходимо також емпіричну лінію регресії (рис. 4.2).

Розраховуємо коефіцієнти для відшукування теоретичної лінії регресії

$$a' = 1,0889; \quad b' = -0,1427.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії:

$$\delta\% = 15,89 - 0,187 \text{ П}\%.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1785.$$

Перевіримо та відшукуємо кореляції між пластичністю та вмістом перліту за t -критерієм Стьюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1785}{\sqrt{1 - 0,1785^2}} \cdot \sqrt{443 - 2} = 3,81.$$

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

Визначаємо адекватність рівняння регресії за t -критерієм Фішера (2.26), маючи наступне, що $F_p = 1,75 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, рівняння регресії, як видно адекватне.

Таблиця 3.1

Кореляція між числом графітних включень і пластичністю високоміцного чавуну

y'	x'	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	Всього		
	$\delta\%$ $N_{\text{ГР}}$	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90	90-100	m_y	$m_{y y'}$	$m_{y'} \cdot y'^2$
0	10-12	6	35	60	40	40	22	21	10	3	237	0	0
1	12-14	2	8	9	14	11	8	4	3	2	61	61	61
2	14-16		4	26	32	20	14	14	6	2	61	122	244
3	16-18		18	33	33	30	33	30	6		61	183	558
4	18-20			16	20	16		8	20		20	80	320
5	20-22				25	35	10	10			16	80	400
m_x		8	51	97	91	83	50	46	23	7	456	526	1584
$m_{xy} y'$		2	30	84	124	112	65	66	35	4	526		
\bar{y}'_x		0,25	0,588	0,865	1,362	1,349	1,30	1,437	1,521	0,571	9,189		
\bar{y}_x		8,356	8,989	10,234	9,567	9,532	9,478	9,546	9,652	19,76	95,114		
$m_x x'$		-16	-51	0	91	164	150	184	115	42	679		
$m_x x'^2$		32	51	0	91	328	450	736	575	216	2661		
$m_{xy} y' x'$		-4	-30	0	124	224	195	264	175	24	972		

Таблиця 3.2

Кореляція між кількістю перліту і пластичністю високоміцного 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	10-12	14	47	63	52	17	18	21	232	0	0
1	12-14	10 10	11 11	22 22	9 9	5 5	3 3	4 4	64	64	64
2	14-16	13 7	27 14	29 13	11 4	9 5	10 6	9 5	54	108	216
3	16-18	26 8	71 23	36 11	16 6		16 7		55	165	495
4	18-20	8 2	32 8		20 5	12 3	12 3	8 2	23	92	368
5	20-22	10 2	35 7	10 2	10 2		10 2		15	75	375
m_x		43	110	111	78	30	33	32	443	504	1518
$m_{xy} y'$		67	176	97	66	26	51	21	504		
\bar{y}'_x		1,588	1,60	0,874	0,846	0,866	1,545	0,656	7,975		
\bar{y}_x		9,546	9,678	9,943	8,782	9,835	9,526	8,873	66,22		
$m_x x'$		-86	-110	0	78	60	99	128	169		
$m_x x'^2$		172	110	0	78	150	297	512	1319		
$m_{xy} y' x'$		-134	-176	0	66	52	153	84	44		

3.1.3. Вплив розміру феритного зерна на пластичність високоміцного чавуну

При розгляді впливу розміру феритного зерна на пластичність високоміцного чавуну звісно побудована кореляційна табл. 3.3, а також розрахована емпірична лінія регресії (рис. 4.3).

При відшукуванні рівняння теоретичної лінії регресії знаходимо коефіцієнти:

$$a' = 1,0983; b' = 0,1896.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії

$$\delta\% = 14,57 + 0,00012\Phi.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,1872.$$

При перевірці кореляції за t -критерієм Стьюдента підтверджено наявність кореляції між пластичністю та розмірами феритного зерна високоміцного чавуну.

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,1872}{\sqrt{1 - 0,1872^2}} \cdot \sqrt{441 - 2} = 4,12.$$

Видно, що $t_{\text{роз}} > t_{\text{табл}} = 1,96$, тому між факторами є кореляція.

Критерій Фішера – вираз (2.26) дає можливість відшукати адекватність рівняння регресії, маємо при $F_p = 0,85 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, отже, рівняння регресії вже адекватне.

Виконаємо перевірку гіпотези про параболічну залежність пластичності від розміру зерна фериту високоміцного чавуну, для цього побудували розширену кореляційну табл. 3.3.

Щоб отримати теоретичну лінію регресії у вигляді параболи відшукуємо коефіцієнти:

$$a' = 1,0836; b' = 0,1951; c' = 0,0342.$$

Теоретична лінія регресії, показана на рис. 4.3:

$$\delta\% = 13,95 - 0,0083\Phi + 0,00054\Phi^2.$$

Кореляційне відношення становить:

$$\eta_T = \sqrt{\frac{\frac{10,994}{441}}{\frac{1478}{441} - \left(\frac{494}{441}\right)^2}} = 0,1089.$$

Так як розраховане кореляційне відношення все ж таки незначно більше коефіцієнта кореляції, то гіпотеза про криволінійну залежність пластичності від розміру феритного зерна не підтверджено.

Таблиця 3.3

Кореляція між пластичністю і розміром феритного зерна високоміцного чавуну

y'	x'	-2	-1	0	1	2	Всього		
	Φ , МКМ $\delta\%$	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	m_y	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
0	10-12	15	83	109	23	5	235	0	0
1	12-14	6 6	23 23	16 16	11 11	3 3	59	59	59
2	14-16	12 6	30 15	46 23	12 6	8 4	54	108	216
3	16-18	12 4	54 18	63 21	27 9	24 8	60	180	540
4	18-20	12 3	24 6	28 7	8 2		18	72	288
5	20-22		15 3	30 6	20 4	10 2	15	75	375
m_x		34	148	182	55	22	441	494	1478
$m_{xy} y'$		42	146	183	78	44	494		
\bar{y}'_x		1,235	0,986	1,005	1,872	2	7,098		
\bar{y}_x		10,107	9,843	9,863	9,564	14	53,37		
$m_x x'$		-68	-148	0	55	44	-117		

$m_x x'^2$	136	148	0	55	88	427		
$m_{xy} y'x'$	-84	-146	0	78	88	-64		
$m_x x'^3$	-272	-148	0	55	176	-189		
$m_x x'^4$	544	148	0	55	352	1099		
\bar{y}'_x	0,8208	0,9141	1,0612	1,2624	1,5168	5,57		
$m_{xy} y'x'^2$	168	146	0	78	176	568		
$(\bar{y}'_x - \bar{y})^2 m_x$	1,3456	2,1158	1,1055	2,5039	3,9236	10,994		
\bar{y}_x	8,8208	8,9141	9,0612	9,2624	9,5168	45,57		

3.1.4. Вплив середнього діаметра графітних включень на пластичність високоміцного чавуну

Для аналізу впливу середнього діаметра графітних включень на пластичність високоміцного чавуну будемо кореляційну таблицю 3.4 для знаходження емпіричної лінії регресії (рис. 4.4).

При відшукуванні рівняння теоретичної лінії регресії визначаємо коефіцієнти:

$$a' = 0,998; \quad b' = -0,0675.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії:

$$\delta\% = 15,8 - 0,0057D_{\text{гр}}.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,06925.$$

Перевірка наявності зв'язу кореляції між пластичністю і середнім діаметром графітних включень виконується за t -критерієм Стьюдента:

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,06925}{\sqrt{1 - 0,06925^2}} \cdot \sqrt{416 - 2} = 1,44.$$

Гіпотеза про кореляцію між пластичністю та середнім діаметром графітних включень не підтверджується, тому, що $t_{\text{роз}} < t_{\text{табл}}$, $t_{\text{табл}} = 1,96$.

Відшукування адекватності моделі за критерієм Фішера отримаємо наступне: так як $F_p = 1,74 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$ рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.4

Кореляція пластичності від середнього діаметра виділень графіту

y'	x'	-3	-2	-1	0	1	2	Всього		
	$\delta\%$ / $D_{гр}, \text{МКМ}$	20-40	40-50	50-70	70-80	80-100	100-110	m_y	$m_y y'$	$m_y \cdot y'^2$
0	10-12	17	61	34	71	21	23	227	0	0
1	12-14	5	11	12	17	10	5	60	60	60
2	14-16	5	17	23	21	9	20	48	95	192
3	16-18	4	44	34	44	18	13	53	157	477
4	18-20		21		39		5	17	65	272
5	20-22	11	19	6	5		6	11	47	275
		3	3	2	1		2			
	m_x	30	103	72	122	42	47	416	424	1276
	$m_{xy} y'$	25	112	75	126	37	49	424		
	\bar{y}'_x	0,833	1,0873	1,059	1,041	0,881	1,042	5,943		
	\bar{y}_x	8,833	9,087	9,059	9,041	8,881	9,042	53,943		
	$m_x x'$	-90	-206	-67	0	42	94	-93		
	$m_x x'^2$	270	412	67	0	42	188	979		
	$m_{xy} y' x'$	-75	-224	-71	0	37	98	-235		

3.1.5. Одержання рівняння множинної кореляції залежності пластичності від структури високоміцного чавуну

Щоб мати загальне уявлення впливу структури на пластичність високоміцного чавуну, отримали рівняння множинної кореляції впливу на пластичність числа графітних включень, вмісту перліту, розміру феритного зерна. Відомо, що ці фактори суттєво впливають на пластичність високоміцного чавуну.

Позначимо:

$$\text{П}\% = x_1; \quad N_{\text{Гр}} = x_2; \quad \Phi = x_3; \quad \delta\% = y.$$

Рівняння множинної кореляції в натуральному масштабі має такий вигляд:

$$y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3.$$

В стандартизованому вигляді рівняння має наступний вигляд:

$$t_{yx_1x_2x_3} = \beta_1 t_1 + \beta_2 t_2 + \beta_3 t_3.$$

Коефіцієнти рівняння будуть визначатися із системи рівнянь:

$$\begin{cases} r_{y1} = \beta_1 + \beta_2 r_{21} + \beta_3 r_{31} \\ r_{y2} = \beta_1 r_{12} + \beta_2 + \beta_3 r_{32} \\ r_{y3} = \beta_1 r_{13} + \beta_3 r_{23} + \beta_3. \end{cases}$$

Підставивши в систему рівнянь коефіцієнти кореляції, отримаємо

$$\begin{cases} 0,1839 = \beta_1 + 0 \cdot \beta_2 + 0 \cdot \beta_3 \\ -0,1785 = 0 \cdot \beta_1 + \beta_2 - 0,1889\beta_3 \\ 0,1872 = 0 \cdot \beta_1 - 0,1889\beta_2 + \beta_3. \end{cases}$$

При розв'язку системи рівнянь маємо:

$$\beta_1 = 0,1182; \quad \beta_2 = -0,14098; \quad \beta_3 = 0,14909.$$

Для відшукування коефіцієнтів регресії в натуральному масштабі необхідно визначити дисперсію і середнє значення результативної ознаки ($\delta\%$):

з табл. 3.4

$$\sigma_y^2 = \left[\frac{1276}{416} - \left(\frac{424}{416} \right)^2 \right] = 2,0287;$$

$$\sigma_y = 1,424 ;$$

з табл. 3.4

$$\bar{y} = \frac{526}{456} + 8,0 = 9,153.$$

Дисперсії і середнє значення факторних ознак були розраховані раніше.

Коефіцієнти рівняння множинної кореляції дорівнюють:

$$b = \beta_1 \frac{\sigma_y}{\sigma_1} = 0,1182 \frac{1,424}{9,5715} = 0,01756;$$

$$c = \beta_2 \frac{\sigma_y}{\sigma_2} = -0,14098 \frac{1,424}{4,243} = -0,0473;$$

$$d = \beta_3 \frac{\sigma_y}{\sigma_3} = 0,14909 \frac{1,424}{18,83} = 0,01127;$$

$$a = \bar{y} - b\bar{x}_1 - c\bar{x}_2 - d\bar{x}_3 = 9,0872 - 0,01756 \cdot 40,773 +$$

$$+ 0,0473 \cdot 6,587 - 0,01127 \cdot 49,734 = 7,842.$$

Рівняння множинної кореляції:

$$\delta\% = 7,84 + 0,017\Phi - 0,047\Pi\% + 0,011N_{гр}.$$

Коефіцієнт множинної кореляції:

$$R = \sqrt{0,1872 \cdot 0,1182 + 0,1785 \cdot 0,14098 + 0,1839 \cdot 0,14909} = \sqrt{0,0549} = 0,273.$$

Коефіцієнт детермінації:

$$D = R^2 = 0,0745.$$

З рівняння множинної кореляції випливає, що суттєвий вплив на пластичність високоміцного чавуну має вміст перліту і число графітних включень. Якщо збільшувати вміст перліту то пластичність високоміцного чавуну зменшується, а при зростанні кількості графітних виділень пластичність високоміцного чавуну збільшується.

3.1.6. Вплив між межею міцності та пластичністю високоміцного чавуну

При відшукуванні залежності між різними показниками механічних властивостей високоміцного чавуну формуємо кореляційні табл. 3.5, 3.6 парних залежностей

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

При аналізі залежності між межею міцності та пластичністю сформуваємо кореляційну табл. 3.5 і побудували емпіричну лінію регресії (рис. 4.5).

При знаходженні теоретичної лінії регресії визначимо коефіцієнти:

$$a' = 3,8678; \quad b' = -0,3967.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії:

$$\sigma_B = 39,97 - 0,022 \delta\%.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,3345.$$

Перевіряючи на кореляцію за допомогою t -критерію Стьюдента, бачимо, що вона підтверджується.

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,3345}{\sqrt{1 - 0,3345^2}} \cdot \sqrt{591 - 2} = 8,618.$$

За t -критерієм Фішера за виразом (2.26) визначимо адекватність рівняння регресії, якщо $F_p = 1,73 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, то рівняння регресії адекватне.

При збільшенні пластичності ($\delta\%$), міцність (σ_B) високоміцного чавуну знижується.

Таблиця 3.5

Кореляція між межею міцності і пластичністю високоміцного чавуну

y'	x'	0	1	2	3	4	5	Всього		
	$\delta\%$ $\sigma_B, \text{кг/мм}^2$	10-12	12-14	14-16	16-18	18-20	20-22	m_y	$m_y \cdot y'$	$m_y \cdot y'^2$
0	32-33	40	9	12	20	6	4	91	0	0
1	33-34	40 40	10 10	10 10	12 12	6 6	3 3	81	81	81
2	34-35	54 27	23 10	24 12	22 14	14 7	9 3	73	146	292
3	35-36	79 27	44 13	42 15	61 19	10 4	7 3	81	243	720
4	36-37	200 51	52 12	32 9	32 7	12 4	12 2	85	340	1360
5	37-38	101 22	46 7	21 5	26 4	6 2		40	200	1000
6	38-39	109 18	49 8	25 5	19 2		8 2	35	210	1260
7	39-40	540 78	58 7	72 11	37 6	17 3	11 1	105	735	5145
m_x		303	76	79	84	32	17	591	1955	9858
$m_{xy} \cdot y'$		1123	282	226	209	65	50	1955		
\bar{y}'_x		3,706	3,710	3,329	2,488	2,031	2,941	18,205		

\bar{y}_x	36,783	36,321	36,041	35,43	35,192	35,375	215,14		
$m_x x'$	0	76	158	252	128	85	699		
$m_x x'^2$	0	76	316	756	512	425	2085		
$m_{xy} y' x'$	0	282	452	627	260	250	1871		

3.1.7. Вплив між пластичністю і твердістю високоміцного чавуну

Залежність між пластичністю і твердістю високоміцного чавуну висвітлена в кореляційній табл 3.6 та в побудові емпіричної лінії регресії (рис. 4.6).

Відшукані коефіцієнти для розрахунку теоретичної лінії регресії:

$$a' = 1,6598; b' = -0,3987.$$

Рівняння теоретичної лінії регресії:

$$\delta\% = 16,50 - 0,0053HB.$$

Коефіцієнт кореляції дорівнює:

$$r = 0,3183.$$

Перевірку коефіцієнта кореляції виконуємо за t -критерієм Стьюдента, при цьому підтверджується наявність кореляції.

$$t_{\text{роз}} = \frac{0,3183}{\sqrt{1 - 0,3183^2}} \cdot \sqrt{519 - 2} = 7,64.$$

За t -критерієм Фішера – вираз (2.26) визначимо звісно адекватність рівняння регресії, $F_p = 1,82 \leq F_{\text{табл}} = 2,0$, маємо адекватне рівняння регресії.

Таблиця 3.6

Кореляція між твердістю і пластичністю високоміцного чавуну

y'	x'	0	1	2	3	4	5	Всього		
	$\delta\%$ / <i>НВ</i>	140-150	150-160	160-170	170-180	180-190	190-200	m_y	$m_{y \cdot y'}$	$m_{y \cdot y'^2}$
0	10-12	53	56	70	20	26	24	249	0	0
1	12-14	35 35	24 24	23 23	4 4	5 5		91	91	91
2	14-16	56 29	40 19	28 15	10 3	10 6		72	144	288
3	16-18	99 34	78 25	39 12	7 4			75	223	675
4	18-20	29 8	33 7	4 3	16 3			21	82	336
5	20-22	30 6	15 3			10 2		11	55	275
m_x		165	134	123	34	39	24	519	595	1665
$m_{xy \cdot y'}$		249	190	94	37	25	-	595		
\bar{y}'_x		1,509	1,417	0,764	1,088	0,641	0	5,419		
\bar{y}_x		9,522	9,36	8,86	8,741	8,542	9,0	54,02		
$m_x \cdot x'$		0	134	246	102	156	120	758		
$m_x \cdot x'^2$		0	134	492	306	624	600	2156		
$m_{xy \cdot y' \cdot x'}$		0	190	188	111	100	-	589		

3.1.8. Отримання рівнянь множинного зв'язку між різними показниками механічних властивостей високоміцного чавуну

Щоб отримати загальне уявлення про залежності між різними показниками механічних властивостей високоміцного чавуну необхідно отримати рівняння множинної кореляції:

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

Наприклад, при отриманні рівняння множинного зв'язку зв'язно з двома факторними ознаками, відшукування коефіцієнтів регресії спрощується. Запишемо для рівняння множинної кореляції

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

Коефіцієнти рівняння відшукуються за такими виразами:

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

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

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

Знаходимо дисперсії та середнє значення межі міцності (σ_B); пластичності ($\delta\%$) і твердості (НВ), які позначимо:

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

з табл. 3.5

$$\bar{z} = \frac{1955}{591} + 33 = 36,3079;$$

$$\bar{y} = \frac{699}{591} + 8,0 = 9,1827;$$

з табл. 3.4

$$\bar{x}_1 = \frac{424}{416} \cdot 8 + 132 = 140,153;$$

$$\sigma_z^2 = \left[\frac{1276}{416} - \left(\frac{979}{416} \right)^2 \right] \cdot 4 = 19,077;$$

$$\sigma_z = 4,36;$$

з табл. 3.6

$$\sigma_y^2 = \left[\frac{1665}{519} - \left(\frac{595}{519} \right)^2 \right] = 1,897;$$

$$\sigma_y = 1,377;$$

$$\sigma_{x_1}^2 = \left[\frac{2156}{519} - \left(\frac{758}{519} \right)^2 \right] \cdot 64 = 129,47;$$

$$\sigma_{x_1} = 11,37.$$

Коефіцієнт множинної кореляції для рівняння виду $x_1 = a + bx_2 + cx_3$,

визначається таким чином:

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

3.1.9. Отримання рівняння множинного зв'язку пластичності від міцності і твердості високоміцного чавуну

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

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

Визначаємо коефіцієнти регресії множинного зв'язку:

$$b = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} \cdot \left[\frac{r_{yz} - r_{yx_1} \cdot r_{zx_1}}{1 - r_{zx_1}^2} \right] = \frac{1,377}{11,37} \left[\frac{-0,3183 + 0,677 \cdot 0,3183}{1 - 0,677^2} \right] = -0,023;$$

$$c = \frac{\sigma_y}{\sigma_{x_1}} \cdot \left[\frac{r_{x_1y} - r_{zy} \cdot r_{zx_1}}{1 - r_{zx_1}^2} \right] = \frac{1,377}{11,37} \left[\frac{-0,3183 + 0,2305 \cdot 0,6773}{1 - 0,6773^2} \right] = -0,0362;$$

$$a = \bar{y} - b\bar{z} - c\bar{x}_1 = 9,157 + 0,023 \cdot 36,312 + 0,0362 \cdot 136,77 = 14,943.$$

Рівняння множинної кореляції:

$$\delta\% = 14,94 - 0,023\sigma_B - 0,036\text{HB}.$$

Визначаємо коефіцієнт множинної кореляції:

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

$$= \sqrt{\frac{0,2305^2 + 0,3183^2 - 2 \cdot 0,677 \cdot 0,2305 \cdot 0,3183}{1 - 0,677^2}} = 0,415.$$

Визначаємо коефіцієнт детермінації:

$$D = R^2 = 0,172.$$

Виходячи з рівняння множинної кореляції видно, що звісно суттєвий вплив на пластичність високоміцного чавуну має твердість. При збільшенні як міцності, так і твердості, пластичність високоміцного чавуну буде зменшуватися.

При цьому, коефіцієнт детермінації D вказує, що зміна пластичності високоміцного чавуну обумовлена зміною твердості і міцності.

3.1.10. Номограма для визначення за відомою твердістю значень міцності і пластичності високоміцного чавуну

З метою використання для неруйнівного контролю механічних властивостей високоміцного чавуну звісно побудована номограма для відшукування за відомою твердістю значень межі міцності і пластичності на підставі отриманих раніше кореляційних залежностей: $\sigma_B = f(\text{HB})$ та $\delta\% = f(\text{HB})$.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

Використовуючи розрахункові дані в середовищі Microsoft Excel, побудували кореляційні поля, емпіричні і теоретичні лінії регресії для дослідження залежностей структури високоміцного чавуну від пластичності.

Проводили як дисперсійний, кореляційний, а також і регресійний аналіз в програмі Microsoft Office Excel як в режимі кореляції, так і регресії в MS Excel для оцінки значущості коефіцієнтів звісно отриманих рівнянь регресії [20, 21].

При аналізі впливу структури високоміцного чавуну на механічні властивості доцільно також застосовувати і пакет програми MathCAD [22, 23, 24, 25].

Отже, коефіцієнти відшукуваних функцій, рівнянь регресій можна розраховувати в середовищі MathCAD. Математичні розрахунки при побудові графіків залежностей $y = f(x)$ здійснювали в середовищі пакету MathCAD, а також звісно графічних редакторів Microsoft Office.

Залежності пластичності високоміцного чавуну від структури, наведено на рис. 4.1–4.7.

4.1. Залежність числа виділень графіту на пластичність високоміцного чавуну

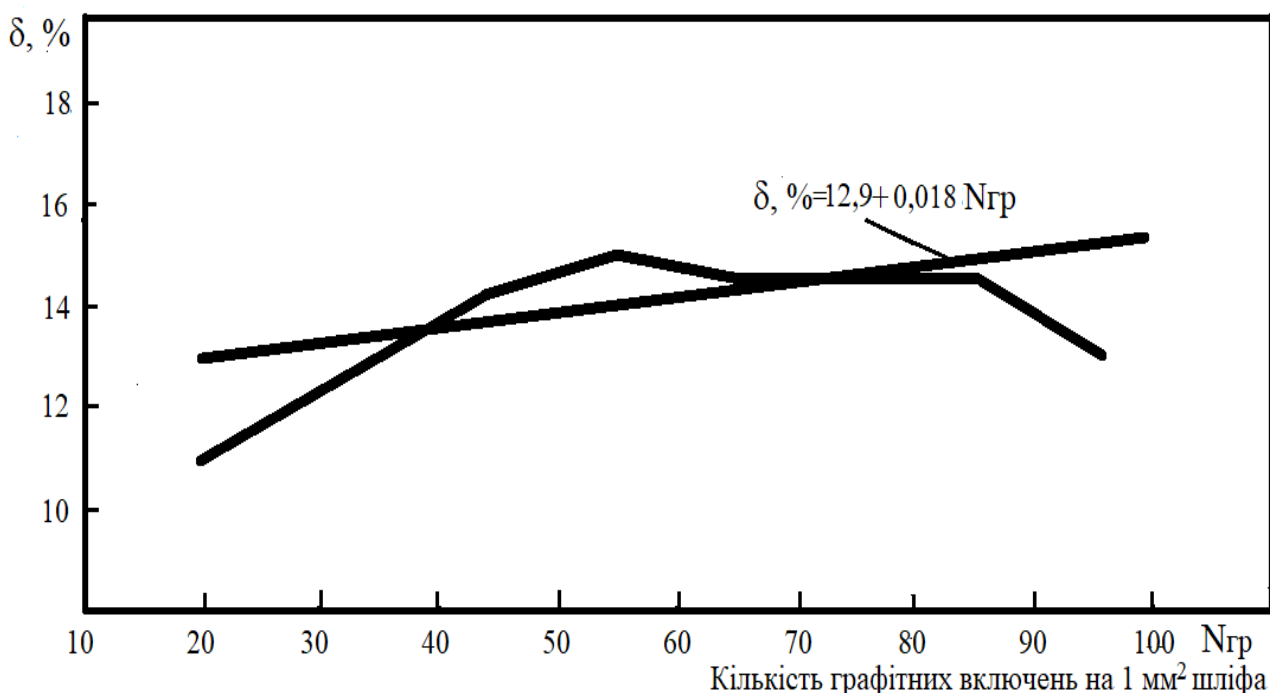


Рис. 4.1. Залежність кількості включень графіту на пластичність високоміцного чавуну

При числі графітних включень менше 55 штук на 1 мм² шліфа згідно з рис. 4.1 видно, що при збільшенні числа графітних включень звісно збільшується пластичність. При збільшенні числа графітних включень більше 55 штук на 1 мм² шліфа пластичність суттєво не змінюється.

4.2. Вплив вмісту перліту на пластичність високоміцного чавуну

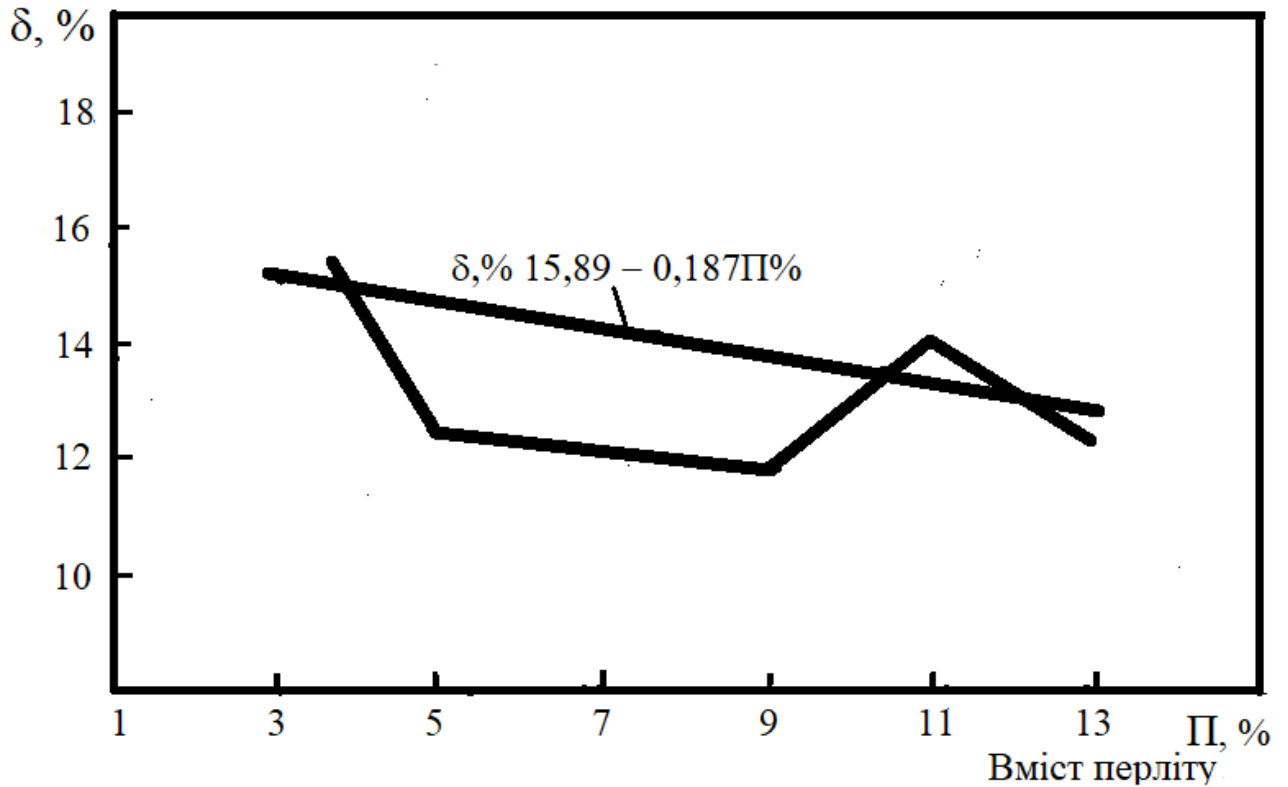


Рис. 4.2. Вплив вмісту перліту на пластичність високоміцного чавуну

З рис. 4.2 видно, що в діапазоні досліджуваної вибірки з підвищенням вмісту перліту у високоміцному чавуні, як бачимо, пластичність зменшується.

4.3. Залежність розміру зерна фериту на пластичність високоміцного чавуну

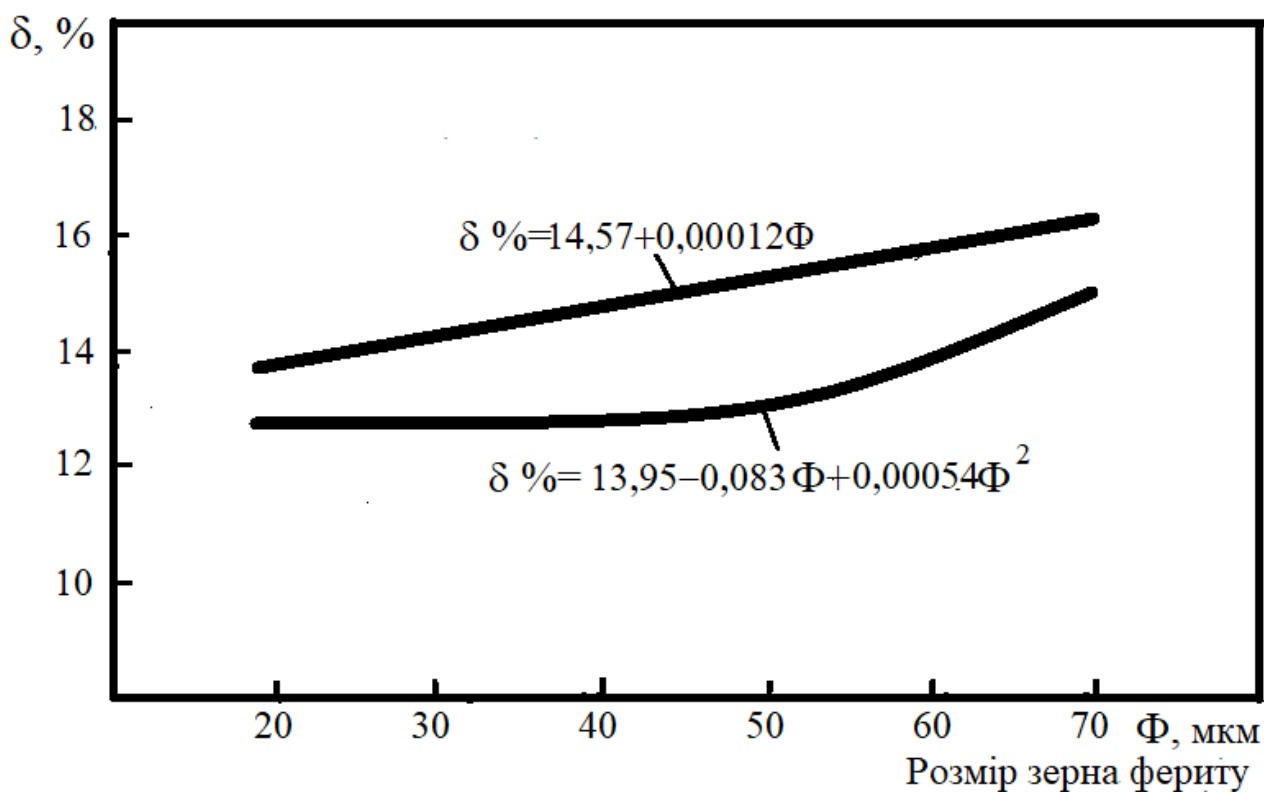


Рис. 4.3. Вплив розміру зерна фериту на пластичність високоміцного чавуну

З рис. 4.3 очевидно, що емпірична лінія регресії має форму, яка всеж таки, більш буде наближена до параболічної, ніж до прямолінійної.

Як видно з рис. 4.3, що в діапазоні досліджуваної вибірки при розмірі феритного зерна до 50 мкм, з збільшенням феритного зерна пластичність суттєво звісно не змінюється. Наприклад, при збільшенні розміру феритного зерна більше 50 мкм, пластичність високоміцного чавуну вже починає зростати.

4.4. Залежність середнього діаметра графітних включень на пластичність високоміцного чавуну

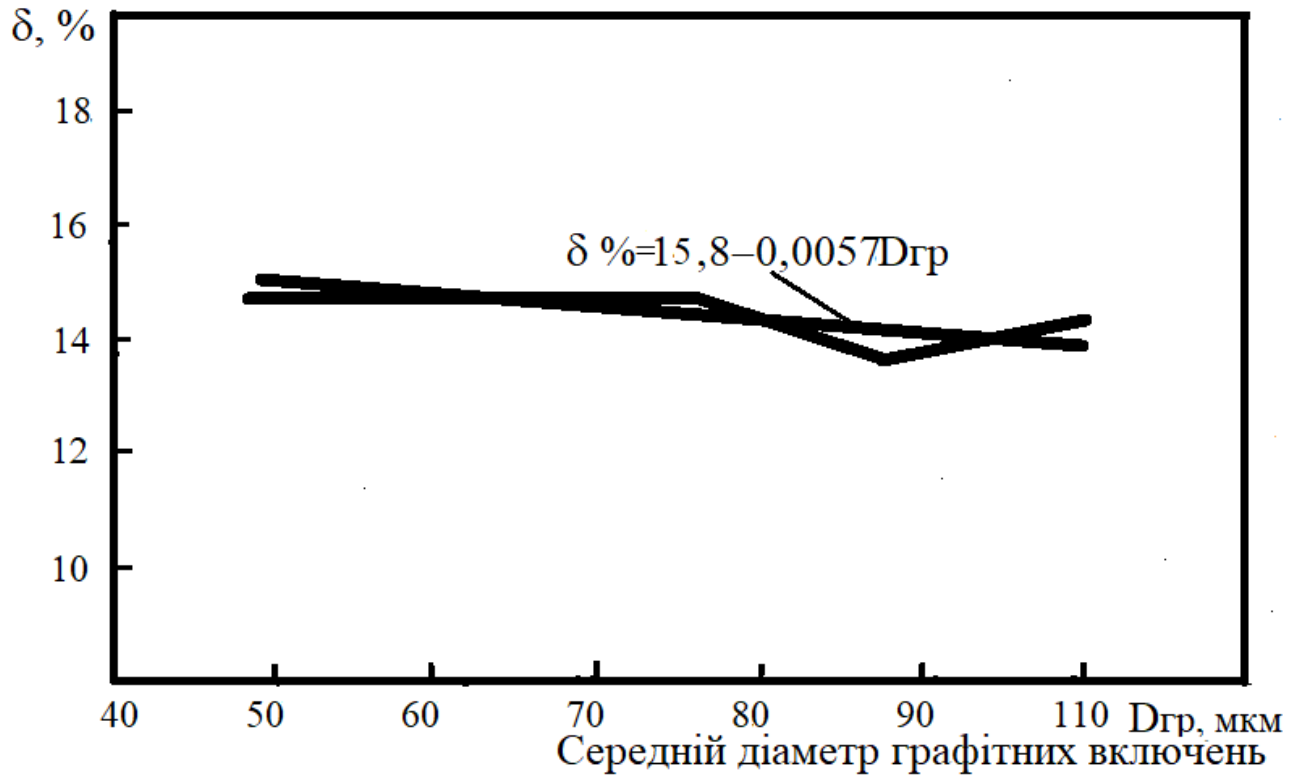


Рис. 4.4. Вплив середнього діаметра графітних включень на пластичність високоміцного чавуну

Зміна розмірів графітних включень в інтервалі досліджуваної вибірки звичайно не призводить до суттєвих змін пластичності високоміцного чавуну (рис. 4.4).

4.5. Залежність межі міцності ковкого чавуну від відносного подовження

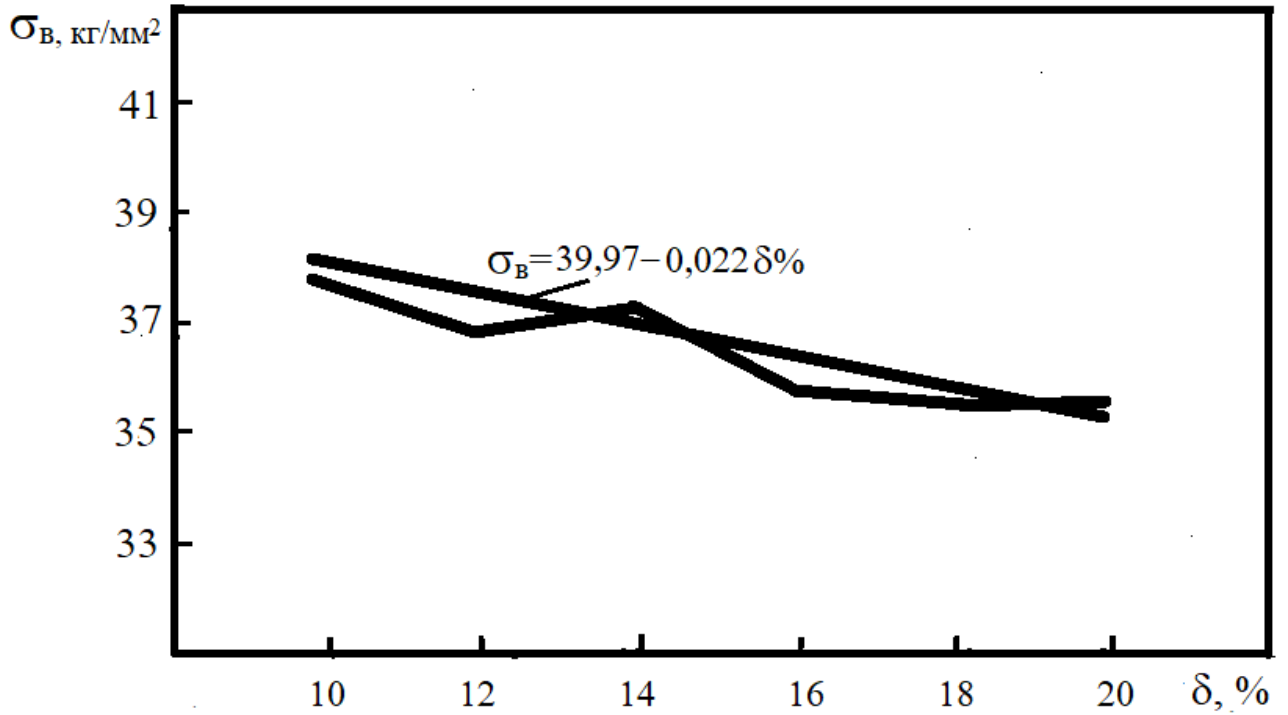


Рис. 4.5. Залежність межі міцності високоміцного чавуну
від пластичності

З рис. 4.5 бачимо, що між міцністю високоміцного чавуну та пластичністю звісно існує тісний кореляційний зв'язок, на це вказує високе значення коефіцієнта кореляції ($r = 0,3345$).

При збільшенні пластичності ($\delta\%$), міцність (σ_B) високоміцного чавуну знижується.

4.6. Залежність між пластичністю високоміцного чавуну і твердістю

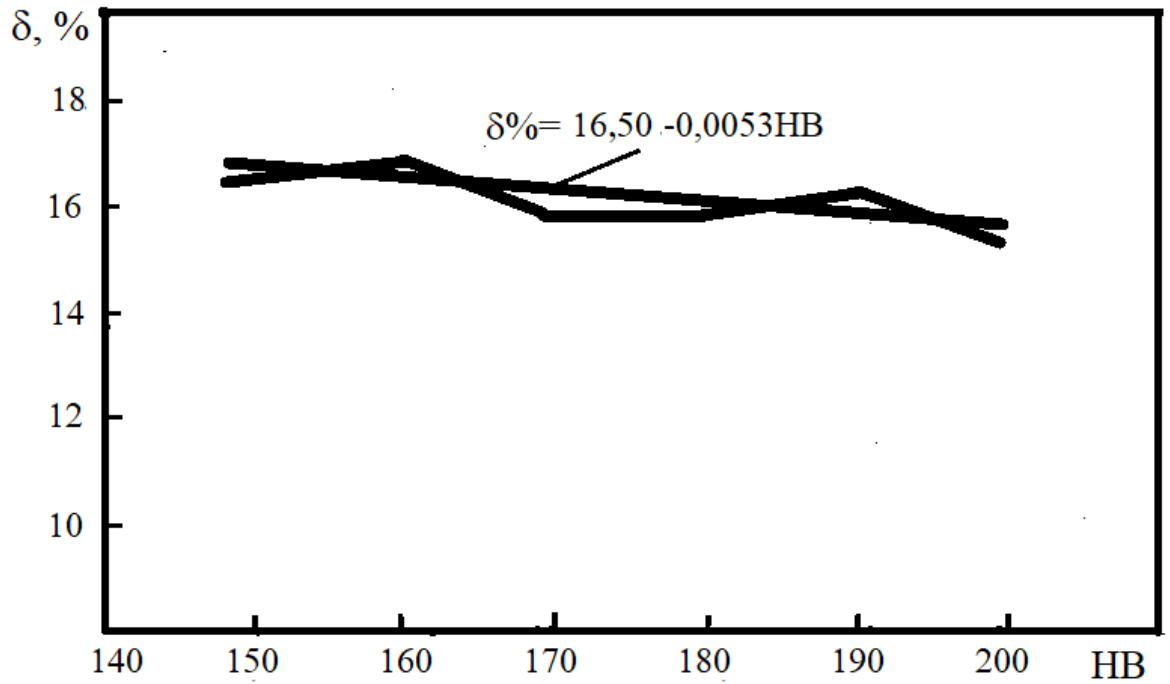


Рис. 4.6. Залежність між пластичністю високоміцного чавуну і твердістю

Між пластичністю чавуну та твердістю звісно існує тісний лінійний зворотній кореляційний зв'язок, маючи високе значення коефіцієнта кореляції ($r = 0,3183$ (рис. 4.6)).

4.7. Побудова номограми для визначення за твердістю значень міцності та пластичності високоміцного чавуну

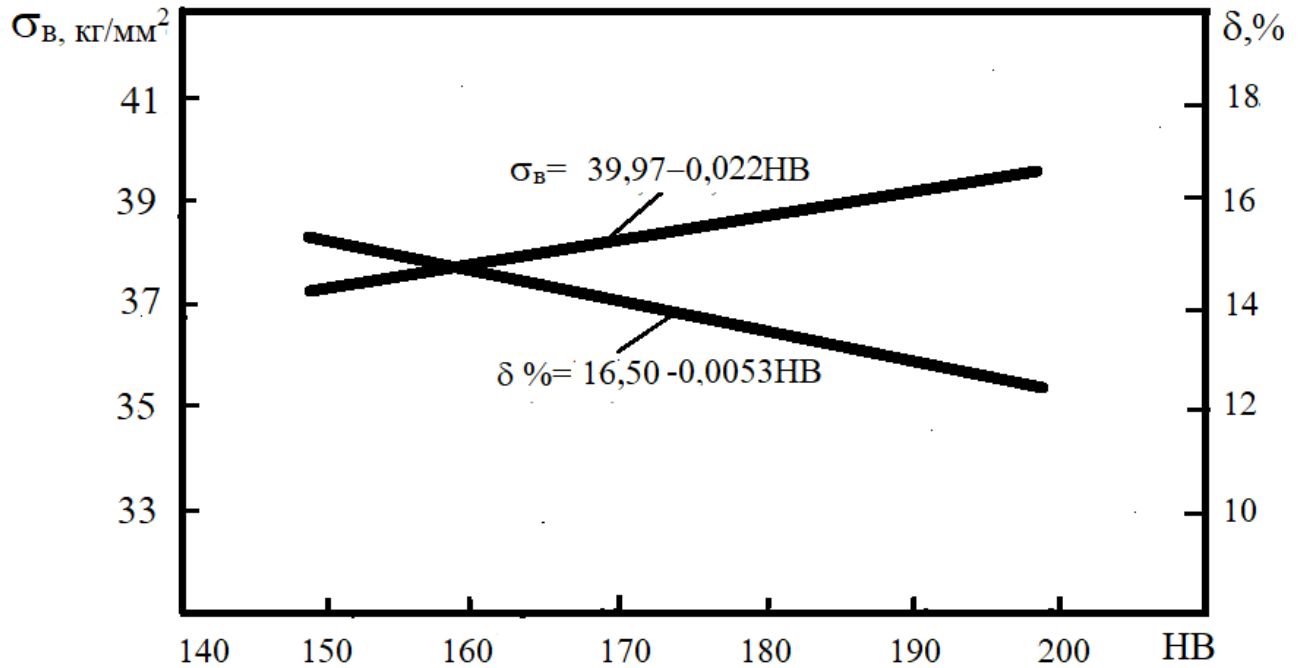


Рис. 4.7. Номограма для визначення значень міцності і пластичності високоміцного чавуну в залежності від твердості

Номограма отримана в результаті побудови на одному графіку звісно двох теоретичних ліній регресії $\sigma_B = f(\text{НВ})$ та $\delta\% = f(\text{НВ})$ при загальній віссі ординат, на якій відкладаються значення твердості.

ВИСНОВКИ

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

З'ясовано, що при числі графітних включень звісно менше 55 штук на 1 мм² шліфа з зростанням числа графітних включень збільшується і пластичність. З підвищенням вмісту перліту у високоміцному чавуні пластичність зменшується. При розмірі феритного зерна до 50 мкм, при зростанні феритного зерна пластичність суттєво не змінюється. Коли зростає розмір феритного зерна вже більше 50 мкм, то пластичність високоміцного чавуну починає збільшуватися.

Показано також, що зі збільшенням пластичності ($\delta\%$), міцність (σ_B) високоміцного чавуну знижується.

Встановлено, що між пластичністю високоміцного чавуну і твердістю існує звісно тісний лінійний зворотній кореляційний зв'язок, про це свідчить високий коефіцієнт кореляції ($r = 0,3183$).

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

Для отримання високоміцного чавуну з підвищеними механічними властивостями необхідно, щоб склад високоміцного чавуну відповідав згідно ДСТУ 3925-99.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Хільчевський В. В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів: навч. посіб. К: Либідь, 2002. 328 с.
2. Клименко В.М., Шиліна О.П, Осадчук А.Ю. Технологія конструкційних матеріалів. *Конструкційні матеріали: властивості, класифікація, виробництво*: навч. посіб. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005, 97 с.
3. Єременко А.П. Виробництво виливків з чорних металів. *Виробництво виливків з чавуну*: конспект лекцій. Кам'янське: ДДТУ, 2017. 74 с.
4. Методичні вказівки з дисципліни “Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство” до виконання лабораторного практикуму з розділу “Вплив хімічного складу і температури на фазовий стан залізовуглецевих сплавів” / Укл.: Трофименко В.В., Клименко О.П., Овчаренко В.І. Д.: ДВНЗ УДХТУ, 2014. 46 с.
5. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисциплін Ливарні сплави та плавка чавунів та Основи теорії плавки та виробництва чавунних виливків для студентів спеціальностей 131 «Прикладна механіка» та 136 «Металургія» всіх форм навчання / Укладачі: В.Г. Іванов, Є.М. Парахневич, С. О. Шустов. Запоріжжя: ЗНТУ, 2020. 62 с.
6. Шигимага В.О. Основи матеріалознавства (метали): чавуни: метод. вказівки для самостійного вивчення дисципліни для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної (заочної) форми навч., спец. 163 «Біомедична інженерія». Державний біотехнологічний університет. Харків, 2023. 21 с.
7. Шаповал С. В. Матеріалознавство: конспект лекцій. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 122 с.
8. Іваненко І. М. Конструкційні матеріали у виробництвах неорганічних речовин [Електронний ресурс] : підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 242 с.
9. Хричиков В.Е., Меняйло О.В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: навч. посіб. 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 / за ред. д.т.н. проф. Скобло Т.С. Х: Діса плюс, 2019. 282с.
11. Іванов В.Г., Парахнєвич Є.М., Шустов С.О. Ливарні сплави та плавка чавунів: метод. посіб. 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*. 2012. № 5. С. 61-66.
13. Бялік Г.А., Наумик В.В., Цивірко Е.І. Практикум з теорії ливарних сплавів та процесів: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2013. 98с.
14. Матеріалознавство: навч. посіб. / Бузило В.І., Сердюк Б.П., Яворський А.В., Гайдай О.А. Дніпро: НТУ «ДП», 2021. 243с.
15. Державний стандарт України. ДСТУ3925-99:2000. Чавун з кулястим графітом для виливків. Загальнотехнічні умови. 2000.
16. Пріщенко О.Л., Черемська Н.В., Черногор Т.Т. Побудова математичних моделей за допомогою методів кореляційного і регресійного аналізу. *Вісник національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах, 2011. №2 (1362). С.29-36.
17. Перегуда О.В., Капустяк О.А., Курилко О.Б. Статистична обробка даних: навч. посіб. [Електронне видання]. 2022. 103с.
18. Бахрушин В.С. Методи аналізу даних: навч. посіб. Запоріжжя: КПУ, 2011. 268с.
19. Руденко В.М. Математична статистика: навч. посіб. К.: ЦУЛ, 2012. 304 с.
20. Василенко О.А., Сенга І.А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях: навч. посіб. Одеса: ОНАО ім. О.С. Попова, 2011. 166с.
21. Бухкало С.І., Іглін С.П. Деякі моделі дослідження структурно-хімічних змін при експлуатації полімерних виробів. *Інтегровані технології*, 2016. №3. С. 52-57.

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

ДОДАТКИ