

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 хімічного складу на механічні властивості
виливків із сірого чавуну методами математичної статистики

Виконав здобувач вищої освіти
II курсу, групи ПМ-22М-1
спеціальності 131
«Прикладна механіка»
_____ Богдан ШЕВЧЕНКО
« ____ » _____ 20 ____ р.

Керівник магістерської роботи
канд. техн. наук, доцент
_____ Олександр КУЗИК
« ____ » _____ 20 ____ р.

Рецензент
канд. техн. наук, доцент
_____ Володимир Мірзак
« ____ » _____ 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 (освітньо-наукова) 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
Шевченку Богдану Петровичу**

1. Тема роботи: Дослідження впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну методами математичної статистики.
2. Керівник роботи: Кузик Олександр Володимирович, к. т. н., доцент.
3. Строк подання роботи до захисту: « ____ » _____ 20 ____ р.
4. Мета та завдання випускної кваліфікаційної роботи.
Мета: вивчення вплив хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну.
Завдання: обґрунтувати напрямок досліджень та актуальність теми; розробити методику досліджень; виконати дослідження та провести аналіз отриманих результатів; виконати розрахунки з економічної частини.

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

_____ Олександр КУЗИК

Завдання прийнято до виконання

« ____ » _____ 20 ____ р.

Підпис здобувача

_____ Богдан ШЕВЧЕНКО

ЗМІСТ

	стор
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1. Аналіз впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну	11
1.2. Критерії оцінки хімічного складу чавуну.....	13
1.3. Критерії оцінки структури і механічних властивостей.....	13
1.4. Вплив вуглецю і кремнію на міцність і твердість виливків із сірого чавуну.....	15
1.5. Вплив марганцю і сірки на міцність і твердість виливків із сірого чавуну.....	16
1.6. Вплив вуглецевого еквівалента та степені евтектичності на міцність і твердість виливків із сірого чавуну.....	17
РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	19
2.1. Об'єкт і предмет дослідження	19
2.2. Методика і матеріал дослідження	19
2.3. Методика розрахунку залежностей впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну.....	19
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СІРОГО ЧАВУНУ.....	28
3.1. Обробка даних у відповідності з методом найменших квадратів для залежності міцності і твердості від хімічного складу сірого чавуну	28
3.2. Кореляційні залежності механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу	86
РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ	90
4.1. Вплив вмісту вуглецю і кремнію на механічні властивості сірого чавуну.....	90

4.2. Вплив сумарного вмісту вуглецю і кремнію на механічні властивості сірого чавуну	93
4.3. Вплив вмісту марганцю і сірки на механічні властивості сірого чавуну.....	94
4.4. Вплив вмісту вуглецевого еквіваленту та степені евтектичності на механічні властивості сірого чавуну.....	96
4.5. Вплив міцності сірого чавуну на його твердість	98
РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА	99
5.1. Обґрунтування та розрахунок економічного ефекту.....	99
ВИСНОВКИ	103
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	104
ДОДАТКИ.....	107

АНОТАЦІЯ

Шевченко Б. П. Дослідження впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну методами математичної статистики, спеціальність 131 «Прикладна механіка», ОПП – «Прикладна механіка», Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, 2023. – 114с. Матеріали ілюстрації 10іл.

Метою дослідження є вивчення впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну.

Дослідження виконувалось методами математичної статистики – методом найменших квадратів і кореляційним аналізом в середовищі Microsoft Office Excel та MathCAD.

Отримані рівняння регресій залежностей механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу. Встановлена тіснота зв'язку між досліджуваними параметрами, встановлено характер впливу вуглецю, кремнію, марганцю, сірки на механічні властивості сірого чавуну. Встановлений оптимальний склад чавуну.

Показано, що суттєвий вплив на механічні властивості має сумарний вміст вуглецю і кремнію. Це дозволяє регулювати хімічний склад для поліпшення міцності і твердості виливків із сірого чавуну.

Запропоновано відповідно оптимальний хімічний склад сірого чавуну для дослідження механічних властивостей.

виливки, сірий чавун, механічні властивості, метод найменших квадратів, кореляція, рівняння регресії

ABSTRACT

Shevchenko B. P. Investigation of the influence of the chemical composition on the mechanical properties of castings from gray iron by the methods of mathematical statistics, specialty 131 “Applied Mechanics”, OPP – “Applied Mechanics”, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, 2023. – 114p. Illustration materials 10 images.

The purpose of the study is to study the influence of the chemical composition on the mechanical properties of gray iron castings.

The research was carried out using the methods of mathematical statistics - the method of least squares and correlation analysis in the environment of Microsoft Office Excel and MathCAD.

Derivation of the regression equation of the dependences of the mechanical properties of gray cast iron on the chemical composition. The closeness of the connection between the investigated parameters was established, and the nature of the influence of carbon, silicon, manganese, and sulfur on the mechanical properties of gray cast iron was established. The optimal composition of cast iron is established.

It is shown that the total content of carbon and silicon has a significant influence on the mechanical properties. This allows you to adjust the chemical composition to improve the strength and hardness of gray iron castings.

The optimal chemical composition of gray cast iron for the study of mechanical properties is proposed.

castings, gray iron, mechanical properties, least squares method, correlation, regression equation

ВСТУП

Актуальність теми

Нині вагоме значення мають дослідження, які направлені на покращення якості і зниження вартості виливків із чавуну, як основного конструкційного матеріалу, який виготовляють в Україні приблизно 21, 675 млн.т, це 1,71% від світового виробництва чавуну.

Застосування виливків із сірого чавуну натеper в машинобудівній промисловості дає змогу підвищити зносостійкість і експлуатаційні властивості деталей машин, що в свою чергу також підвищує надійність конструкцій та деталей і машин для галузі машинобудування України.

Наразі значно виріс інтерес до проблем лиття чавуну – формування структури і механічних властивостей чавуну.

Важливим показником якості сірого чавуну є його механічні властивості, які залежать від його хімічного складу і структури та визначених технологічних процесів плавки і отримання форм.

Для аналізу процесів формування структури і механічних властивостей велика увага приділяється теорії кристалізації. Вивчення теорії кристалізації в процесах лиття дуже тісно пов'язано з дослідженням закономірностей структури і механічних властивостей в залежності від хімічного складу чавуну.

Дослідження чавунів нині показують, що в процесах отримання чавунного литва необхідно надавати важливого значення прийомам та методам коригування хімічного складу чавуну.

Основні направлення роботи – це визначення оптимальних технологічних параметрів, які дозволяють регулювати хімічний склад і структуру виливків з метою покращення їх якості і зниження вартості.

З вищевикладеного матеріалу дослідження по вивченню впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну видно, що це питання є актуальним, а робота, яка спрямована на підвищення міцності і

твердості виливків із сірого чавуну в залежності від хімічного складу нині є актуальним науково-практичним завданням.

Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є вивчення впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні *задачі*:

- отримати рівняння регресій залежностей механічних властивостей виливків із сірого чавуну від хімічного складу;
- дослідити вплив вмісту вуглецю і кремнію на механічні властивості сірого чавуну;
- дослідити вплив сумарного вмісту вуглецю і кремнію на механічні властивості сірого чавуну;
- дослідити вплив вмісту марганцю і сірки на механічні властивості сірого чавуну;
- дослідити вплив вуглецевого еквіваленту і степені евтектичності на механічні властивості сірого чавуну;
- вивчити залежність між міцністю і твердістю виливків із сірого чавуну;

Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є виливки із сірого чавуну. Предмет дослідження – вивчення впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну.

Наукова новизна одержаних результатів

Запропоновано відповідно оптимальний хімічний склад сірого чавуну для дослідження механічних властивостей.

Уперше проведено дослідження залежностей механічних властивостей виливків із сірого чавуну для відповідного хімічного складу згідно ДСТУ8833 $C=3,1-3,7\%$; $Si=1,9-2,5\%$; $Mn=0,45-0,75\%$; $S=0,04-0,14\%$; $P=0,2\%$.

Показано, що найбільший суттєвий вплив на механічні властивості має сумарний вміст вуглецю і кремнію, а також вуглецевий еквівалент. Позитивний вплив на механічні властивості сірого чавуну надають марганець і сірка.

Практичне значення отриманих результатів

Проведене дослідження впливу хімічного складу сірого чавуну на механічні властивості показує, що необхідно регулювати і коригувати хімічний склад для поліпшення і збільшення механічних властивостей виливків із сірого чавуну.

Апробація результатів роботи

Основні результати роботи доповідались на ***VIII Міжнародній науково-практичній дистанційній конференції*** «Modern problems of science, education and society» 9-11 жовтня 2023 року у м. Київ, Україна.

Публікації

Результати роботи опубліковані в 2023 році у збірнику тез ***VIII Міжнародної науково-практичної дистанційної конференції*** «Modern problems of science, education and society» 9-11 жовтня 2023 року у м. Київ, Україна. Тема: Дослідження впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну методами математичної статистики. Отримано сертифікат (див. Додаток 2).

The 8th International scientific and practical conference “Modern problems of science, education and society” (October 9-11, 2023) SPC “Sciconf.com.ua”, Kyiv, Ukraine. 2023. P.254-258.

РОЗДІЛ 1. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБРАНОГО НАПРЯМКУ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Аналіз впливу хімічного складу на механічні властивості випливів із сірого чавуну

У забезпеченні оптимального хімічного складу чавуну при плавці в індукційно тигельній печі є вагомими труднощі, які пов'язані з нестабільністю хімічного складу металобрухту, феросплавів та інших матеріалів, які застосовують для корекції хімічного складу чавуну [1].

Наведено огляд при оцінці стабільності хімічного складу синтетичного чавуну і механічних властивостей [2].

Розглянуто структуру, а також класифікацію чавунів та їх фізико-механічні властивості [3].

Розглянуто поняття вуглецевого еквіваленту C_E і степені евтектичності S_E , а також відношення вмісту C/Si для характеристики хімічного складу та механічних властивостей. Наведенні результати досліджень величин C_E , S_E і C/Si хімічного складу чавуну [4].

Вуглець і кремній, практично є головними елементами, які сприяють графітизації чавуну. Наприклад, кремній підвищує механічні властивості тільки при вмісті C менше 3,0-3,5%, а вже при більш високому вмісті вуглецю в структурі чавуну утворюються грубі включення графіту типу $\Gamma_{ф1}-\Gamma_{р1}-\Gamma_{раз1000}$, $\Gamma_{раз750}$. Вміст Si не повинен перевищувати 3% для запобігання утворення висококремністого фериту, що різко зменшує пластичність. Треба, щоб виконувалась однорідність властивостей в різних перерізах випливів і для забезпечення цієї вимоги необхідно зменшувати сумарний вміст ($C+Si$) в сірому чавуні. Наприклад, при введенні феросплавів в чавун суттєво виникає графітизуючий вплив Si [3].

Марганець збільшує розчинність вуглецю в чавуні, наприклад, при вмісті більше 0,5% Mn уповільнює графітизацію, але збільшує схильність чавуну до відбілювання. А призначення Mn в чавуні – це нейтралізація шкідливого

впливу S, а також він сприяє подрібненню перлітної структури матриці, збільшуючи міцність чавуну [3].

Сірка, наприклад, є шкідливою домішкою в чавуні. При достатній кількості Mn сірка зв'язується в сульфід MnS і потім виводиться в шлак. А вільна S, яка не зв'язується в MnS, гальмує графітизацію при зменшенні евтектичності чавуну.

Фосфор, наприклад, утворює в чавуні подвійну і потрібну фосфідну евтектику. При цьому знижується ударна в'язкість чавуну і схильність до холодних тріщин, а при цьому збільшується твердість і міцність чавуну [3].

Механічні властивості чавуну будуть визначатися співвідношеннями структурних складових фериту, перліту і графіту. Значний вплив має кількість, форма, розмір і характер розподілу включень графіту. Включення графіту знижують міцність чавуну при зменшенні ефективної площі поперечного перерізу [3].

Залежність механічних властивостей від хімічного складу чавуну можна виразити через степінь евтектичності S_E або вуглецевий еквівалент C_E [4].

В заевтектичних чавунах формується феритна матриця з гніздоподібним ($\Gamma_{\phi 4}$) або компактним графітом ($\Gamma_{\phi 9}$).

Найкращі механічні властивості мають доевтектичні чавуни, які дуже широко використовуються для виготовлення складних і відповідальних виливків.

Для орієнтовного розрахунку механічних властивостей за рівнем евтектичності використовують емпіричні формули [4]

$$\sigma_B = 102 - 82,5 \cdot S_E \quad (1.1)$$

$$HB = 538 - 355 \cdot S_E \quad (1.2)$$

Менша твердість при однаковій міцності забезпечує кращі якості чавуну – це пластичність, в'язкість, оброблюваність.

Так для оцінки механічних властивостей чавуну рекомендується використовувати показник якості ПЯ у вигляді відношення σ_B/HB –

відношення міцності і твердості, тобто відношення вимірних фактичних величин до розрахункових за наведеними вище виразами (1.1) і (1.2).

1.2. Критерії оцінки хімічного складу чавуну

Хімічний склад сірого чавуну є головним фактором, який визначає механічні властивості виливків із нього. Елементами хімічного складу, які впливають на механічні властивості сірого чавуну, є вуглець, кремній, марганець, сірка і фосфор, але основні з них це вуглець і кремній.

Натепер вивчають вплив на властивості чавуну не тільки окремих елементів, але також і їх комплексний вплив, наприклад, вплив степені евтектичності S_E [4], вуглецевого еквівалента C_E [4], вплив кремнію на графітизацію заевтектичного синтетичного чавуну [5], залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його C_E та S_E [6], вплив кремнію і марганцю на властивості сірого чавуну [7].

1.3. Критерії оцінки структури і механічних властивостей сірого чавуну

Згідно ДСТУ8833, структуру сірого чавуну визначають за будовою включень графіту. При цьому оцінка форми і розподілу включень графіту визначається тільки якісно. Кількість включень графіту оцінюється площею, яку вони займають на площині аналізованого шліфу, величина включень графіту визначається її довжиною і діаметром в мм.

Металева основа за ДСТУ8833 визначається, як феритна (98% фериту), перлитна, перліто-феритна в різних співвідношеннях між перлітом і феритом з різною дисперсністю перліту. В роботі [8] наведені механічні властивості та рекомендований склад сірого чавуну.

Аналізуючи критерії оцінки структури сірого чавуну, які наведені в ДСТУ8833, можна зробити висновок, що деякі з них якісні (форма і розподіл графіту), а деякі (розмір і кількість включень графіту і перліту) мають кількісний характер. Тому властивості сірого чавуну суттєво залежать від форми графітних включень. У зв'язку з цим, що натепер виконуються спроби встановити математичні залежності між механічними властивостями сірого

чавуну і формою графітних включень, запропонований кількісний критерій оцінки форми і числа включень графіту. Таким критерієм є величина, яку називають індекс графіту J_{Γ} . Під ним розуміють відношення суми максимальних довжин або діаметрів включень графіту до загальної довжини підрахунку [9].

Значення індексу графіту визначається за виразом [9]:

$$J_{\Gamma} = \frac{\sum a_i \cdot Z}{L} \quad (1.3)$$

де $\sum a_i \cdot Z$ – сума максимальних довжин або діаметрів врахованих включень графіту в поділу окулярної шкали; Z – ціна одного поділу окулярної шкали, мкм; L – довжина підрахунку.

Індекс графіту зменшується при переході від однієї форми графіту до іншої. Так, для пластинчастого графіту $J_{\Gamma}=1,47$, для вермикулярного $J_{\Gamma}= 0,52$ при незмінному числу включень.

Залежність міцності сірого чавуну від значення індексу графіту описується наступною залежністю [9]:

$$\sigma_B = 523 - 289 \cdot J_{\Gamma} \quad (1.4)$$

В роботі [10] наведено вираз для розрахунку σ_B (границі міцності від форми та об'ємного вмісту включень графіту)

$$\sigma_B = \sigma_B^m \left(1 - \frac{3\sqrt{\lambda \cdot f_p}}{2 + f_p} \right) \quad (1.5)$$

де σ_B^m - границя міцності матриці; f_p - об'ємний вміст включень графіту; $\lambda = a/c$ - параметр форми включень графіту.

Певний інтерес представляють нові критерії оцінки механічних властивостей чавуну, наприклад, відносна міцність (ВМ), відносна твердість (ВТ), показник якості (ПЯ), які визначаються за наступними виразами:

$$ВМ = \frac{\sigma_B}{102 - 82,5 \cdot S_E} \quad (1.6)$$

$$BM = \frac{\sigma_B}{100,6 - 80 \cdot S_E} \quad (1.7)$$

$$BT = \frac{HB}{538 - 355 \cdot S_E} \quad (1.8)$$

$$BT = \frac{HB}{465 - 270 \cdot S_E} \quad (1.9)$$

$$BT = \frac{HB}{100 + 4,3 \cdot \sigma_B} \quad (1.10)$$

$$BT = \frac{\sigma_B}{125 - 34 \cdot \sigma_B} \quad (1.11)$$

$$ПЯ = \frac{BM}{BT} = \frac{\sigma_B}{HB} \cdot \frac{538 - 355 \cdot S_E}{102 - 82,5 \cdot S_E} \quad (1.12)$$

де σ_B, HB – дійсна міцність і твердість сірого чавуну; S_E – евтектичність.

1.4. Вплив вуглецю і кремнію на міцність і твердість виливків із сірого чавуну

Хімічний склад чавуну має важливий вплив на механічні властивості сірого чавуну, тому він проявляється в зміні структури і отже механічних властивостей.

Впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну присвячено дуже багато робіт. Основними елементами, які впливають на механічні властивості сірого чавуну є вуглець і кремній, тобто вони є графітизуючими елементами, які мають найбільший вплив на властивості чавуну. Таким чином, Si, зменшує розчинність C в рідкому і твердому розчинах сприяє графітоутворенню, а отже, знижує твердість [5].

Наприклад, вплив вуглецю і кремнію на механічні властивості чавуну розглядають спільно і найчастіше як функція вуглецевого еквіваленту ($C+0,3Si$), або евтектичності. Це допустимо тільки для сірого чавуну, в якому із зниженням вуглецевого еквіваленту S_E або евтектичності S_E зменшується кількість евтектики, а відповідно, збільшується склад аустеніту, при цьому

зміцнюється всю структуру. Крім того, також при цьому подрібнюється виділення графіту, що в сукупності мають, наприклад, значно підвищувати твердість чавуну. Підвищення вуглецевого еквівалента S_E дає змогу збільшувати кількість графіту і знижувати кількість перліту і одночасно сприяє збільшенню довжини графітових включень, а також зменшенню дисперсності перліту. Отже зниження вмісту вуглецю і кремнію забезпечує підвищення твердості чавуну за рахунок зменшення феритної складової – отримання дисперсності перліту, зменшення вмісту і подрібнення графіту [4-7].

Наприклад, вплив вмісту вуглецю і кремнію на механічні властивості сірого чавуну описується наступними залежностями [4-8]:

$$\sigma_{B30} = 102 - 82,5 \cdot S_E \quad (1.13)$$

$$\sigma_{B30} = 100,6 - 80 \cdot S_E \quad (1.14)$$

$$HB_{30} = 538 - 355 \cdot S_E \quad (1.15)$$

$$HB_{30} = 465 - 270 \cdot S_E \quad (1.16)$$

σ_{B30} , HB_{30} – межа міцності при розтягу і твердості по Брінеллю стандартного зразка діаметром 30 мм; S_E – евтектичність сірого чавуну.

1.5. Вплив марганцю, сірки і фосфору на міцність і твердість виливків із сірого чавуну

Марганець і сірка мають певний вплив на властивості чавуну ці елементи гальмують графітизацію. Разом з тим вони мають велику взаємну хімічну спорідненість і утворюють в чавуні тугоплавкі малорозчинні сульфіди марганцю. Марганець, не зв'язаний з сіркою, знаходиться в розчині і розподіляється у визначеному співвідношенні між цементитом і аустенітом (феритом). Марганець знижує температуру γ - α – перетворення, розширює область γ – розчину і сприяє стабілізації і підвищенню дисперсності перліту. Завдяки цьому підвищенню вмісту марганцю до 1,5% позитивно впливає на механічні властивості сірого чавуну [7].

Наприклад, сірка в чавуні присутня у вигляді сульфідів або у вигляді евтектики, дуже гальмує графітизацію. При цьому знижуються механічні

властивості із-за утворення на межі зерен крихкої евтектики. Нейтралізація цього впливу і максимальна ступінь графітизації досягається при відношенні марганцю до сірки, яке дорівнює 4:5.

Наприклад, із збільшенням вмісту фосфору суттєво підвищується твердість, знижується пластичність і в'язкість. Механічні властивості з початку збільшуються, а при виділенні фосфідної евтектики знижуються.

1.6. Вплив вуглецевого еквівалента та степені евтектичності на міцність і твердість виливків із сірого чавуну

Вплив C, Si, а також інших елементів на склад чавуну відносно евтектичної концентрації використовується така характеристика як ступінь евтектичності S_E , вона має велике значення для оцінки властивостей чавуну. У відповідності з діаграмою Fe–C, S_E розраховуємо за наступними виразами [4,6]

$$S_E = \frac{C - C_E}{C_c - C_E} \quad (1.16)$$

де C – вміст вуглецю в чавуні, %;

C_E і C_c – вміст вуглецю у відповідних точках діаграми стану ($C_c = 4,26$). В доевтектичних чавунах S_E змінюється від 0 до 1. При $S_E > 1$, це заевтектичні чавуни [4,6]

$$S_E = \frac{C, \%}{4,3 - 0,3(Si + P), \%} \quad (1.17)$$

де C, Si, P – вміст в чавуні вуглецю, кремнію, фосфору.

Але вирази (1.16) і (1.17) для сірого чавуну мають обмежене значення і використовуються для порівняльного вузького діапазону хімічного складу. В зв'язку з цим в роботах [4, 6,] вказується, що міцність сірого чавуну при одній і тій же евтектичності збільшується зі зменшенням C:Si, тобто, зменшення вмісту вуглецю в межах однієї і тієї ж евтектичності підвищує міцність сірого чавуну.

Значення S_E чавуну в гальмових колодках знаходяться в інтервалі 0,41–0,55 [11], а в чавуні для «клини Ханіна» в діапазоні 0,40–0,60 [11].

Для розрахунків S_E також можна використовувати наступний вираз [4, 6]

$$S_E = \frac{C}{(4,26 - 0,3Si - 0,33P - 0,45S + 0,03Mn)} \quad (1.18)$$

З підвищенням S_E механічні властивості знижуються – це зумовлено формуванням маломіцної феритної матриці і утворенням великої кількості пластинчатого графіту прямолинійної або голкоподібної форми ($\Gamma_{\phi 1} - \Gamma_{\phi 3}$).

Наступна характеристика, яка виражає еквівалентний вміст вуглецю в чавуні – це вуглецевий еквівалент C_E , який розраховується за наступним виразом [4, 6]

$$C_E = C + 0,3Si + 0,33P + 0,45S - 0,03Mn \quad (1.19)$$

Якщо при розрахунку $C_E < 4,26$, то чавун відноситься до доєвтектичних, а при $C_E > 4,26$ – це вже заєвтектичні чавуни.

Вуглецевий еквівалент C_E залежить, головним чином, від вмісту вуглецю, а від вмісту кремнію в меншій мірі. Кореляції між C_E і вмістом кремнію у чавуні гальмових колодок не виявлено. Марганець на C_E майже не впливає [4, 11].

Відомо, що зі збільшенням вуглецевого еквіваленту зростає кількість графіту і внаслідок цього зменшується об'ємна та ливарна усадка а також збільшується рідкотекучість.

Тому, величини C_E і S_E , узагальнюють та розкривають можливості хімічного складу сірого чавуну та технологію його виробництва.

В роботах [12,13] звертається увага на те, що суттєве підвищення механічних властивостей сірого чавуну можливо кількістю і структурними особливостями графітової складової при оптимальному відповідному хімічному складу, а також вплив C, Si, Mn, S, P на міцність та твердість та методика їх визначення.

РОЗДІЛ 2. ОБ'ЄКТ І МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ

2.1. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом проведення дослідження є сірий чавун з відповідним хімічним складом згідно ДСТУ8833:2019 $C = 3,1\text{--}3,7\%$; $Si = 1,9\text{--}2,5\%$; $Mn = 0,45\text{--}0,75\%$; $S = 0,04\text{--}0,14\%$; $P = 0,2\%$; [14], який широко використовується в промисловості і плавиться в індукційно-тигельній печі. Предметом дослідження є вивчення впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну.

Температура випуску сірого чавуну з індукційно тигельної печі 1380-1400 °С. Температура заливки сірого чавуну у форми 1320-1360 °С.

2.2. Методика і матеріал дослідження

Для вивчення механічних властивостей сірого чавуну відливали стандартні зразки у відповідності з ДСТУ EN ISO 14284:2014. Випробування міцності отриманих зразків на розтяг виконували у відповідності ДСТУ EN 10002-1:2006 та визначення твердості за Брінеллем у відповідності ДСТУ ISO 6506-1:2007 [14].

Стандартні зразки відливали на ПАТ «Завод гідравлічних машин цукрогідромаш». Випробування цих зразків виконували також там у випробувальній лабораторії на міцність і твердість сірого чавуну, а результати фіксували в протоколах, які наведені в (Додатку 1) [14].

2.3. Методика розрахунку залежностей впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну

Дослідження впливу хімічного складу на структуру і механічні властивості сірого чавуну натепер дуже актуально.

Вивчення властивостей чавуну в залежності від хімічного складу, структури і інших факторів необхідні для оцінки якості виливків, розробки методів вдосконалення та розробки більш ефективних технологічних процесів.

Дослідження впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну виконували за допомогою математичної статистики, в основі якої лежить метод найменших квадратів (МНК), а також теорія кореляції і регресійний аналіз [15- 20].

У випадку однієї незалежної змінної апроксимуючу функцію найчастіше шукають у вигляді полінома (поліноміальна модель)

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

Наприклад, залежності механічних властивостей сірого чавуну від його хімічного складу шукаємо у вигляді таких функцій [15, 16, 20]:

– лінійної $y = b_1x + b_0;$ (2.2)

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

– поліноміальної третього ступеня $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0.$ (2.4)

Побудова математичних регресійних моделей виконується за допомогою методів кореляційного і регресійного аналізу, так, як кореляційний аналіз – сукупність методів виявлення кореляційного зв'язку між величинами (параметрами). Регресійний аналіз дослідження впливу хімічного складу на структуру і механічні властивості сірого чавуну є перевіркою наявності встановлення типу зв'язку між незалежними змінними X_i (факторами), значення яких можуть змінюватись від залежної змінної Y_i (функції відгуку) [15-19].

Використовуючи класичний регресійний аналіз і методи побудови математичних моделей досліджуваної системи впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну, можна визначити параметри моделей і перевірити їх на адекватність [15-19].

Суть регресійного аналізу наступна: обираємо гіпотетичну модель, формулюємо гіпотезу про фактори, які суттєво впливають на досліджувану характеристику системи і тип залежності відгуку від факторів (вплив хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну). За наявними емпіричними даними про залежність функції відгуку від факторів оцінюємо параметри обраної моделі і за статистичними критеріями перевіряємо її на адекватність. Оцінку параметрів можливо отримувати при застосуванні методу найменших квадратів (МНК) [15-19].

Задача побудови регресійної моделі полягає у визначенні функції $y(b, x)$, для якої функціонал нев'язки є мінімальним

$$f(b) = \sum_{i=1}^n (y(b, x) - y_i)^2 \rightarrow \min. \quad (2.5)$$

де $y(b, x)$ – значення функції, яка апроксимує залежність в i -й точці; y_i – значення емпіричної залежності; b – вектор параметрів, які треба знати, x – вектор незалежних змінних.

Отримана функція $y(b, x)$ є регресійною моделлю. Методом її розв’язку є МНК.

Наприклад, рівняння регресії має вигляд:

$$y = b_1 x + b_0. \quad (2.6)$$

У рівнянні (2.6) маємо два невідомі коефіцієнти b_0, b_1 .

Використовуючи МНК, рівняння регресії наведемо у наступному вигляді

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x)^2 \rightarrow \min. \quad (2.7)$$

З класичної теорії регресії МНК відомо, що мінімум деякої функції досягається при одночасній рівності нулю часних похідних за невідомими коефіцієнтами [15-19]

$$\frac{\partial f}{\partial b_0} = 0; \quad \frac{\partial f}{\partial b_1} = 0. \quad (2.8)$$

Визначаємо частинні похідні і розв’язуємо систему рівнянь

$$\frac{\partial f}{\partial b_0} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x); \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial f}{\partial b_1} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x \cdot x). \quad (2.10)$$

Отже, після перетворень отримуємо систему рівнянь

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x)^2 = 0 \\ \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 - b_1 x)^2 = 0. \end{cases} \quad (2.11)$$

Далі розкриваємо дужки і проводимо перетворення

$$\begin{cases} nb_0 + \sum_{i=1}^n b_1 x_i = \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n b_0 x_i + \sum_{i=1}^n b_1 x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i x_i. \end{cases} \quad (2.12)$$

Використовуючи метод Крамара, знаходимо рівняння для розрахунку коефіцієнтів b_0, b_1 .

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - \sum_{i=1}^n y_i x_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}; \quad (2.13)$$

$$b_1 = \frac{n \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i - \sum_{i=1}^n y_i \cdot \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2}. \quad (2.14)$$

Залежність між вхідними і вихідними параметрами може задаватись у вигляді рівняння регресії, яке має наступний вигляд [15-19]:

$$y = b_2 x^2 + b_1 x + b_0. \quad (2.15)$$

Відповідно з МНК коефіцієнти регресійної моделі знаходимо наступним чином:

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2)^2 \rightarrow \min. \quad (2.16)$$

Далі знаходимо похідні по коефіцієнтах регресії b_0, b_1, b_2 від функції f

$$\frac{\partial f}{\partial b_0} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2); \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial f}{\partial b_1} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2) x; \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial f}{\partial b_2} = 2 \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2) x^2. \quad (2.19)$$

Наступний крок: прирівнюємо вирази до нуля

$$\sum_{i=1}^n y_i = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2) = 0; \quad (2.20)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i = \sum_{i=1}^n (b_0 x + b_1 x^2 + b_2 x^3) = 0; \quad (2.21)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i x_i^2 = \sum_{i=1}^n (b_0 x^2 + b_1 x^3 + b_2 x^4) = 0. \quad (2.22)$$

Отже, після перетворень отримаємо таку систему рівнянь

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 = \sum_{i=1}^n y_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^2. \end{cases} \quad (2.23)$$

З системи рівнянь (2.23) визначаємо коефіцієнти регресії b_0, b_1, b_2 . Для розв'язання цієї системи рівнянь використовуємо метод єдиного ділення Гауса і визначаємо коефіцієнти апроксимуючої функції.

Для побудови залежності такого типу $y = b_3 x^3 + b_2 x^2 + b_1 x + b_0$ необхідно нам чотири рівняння, які одержуємо при визначенні часних похідних з наступних умов [15-19]

$$f = \sum_{i=1}^n \Delta y_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - b_0 + b_1 x + b_2 x^2 + b_3 x^3)^2 \rightarrow \min ; \quad (2.24)$$

$$\begin{cases} nb_0 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_3 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_3 \sum_{i=1}^n x_i^4 = \sum_{i=1}^n y_i x_i \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i^2 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_3 \sum_{i=1}^n x_i^5 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^2 \\ b_0 \sum_{i=1}^n x_i^3 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^5 + b_3 \sum_{i=1}^n x_i^6 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^3 \end{cases} \quad (2.25)$$

Це призводить до системи лінійних рівнянь відносно коефіцієнтів розмірності 4x5. При порівнянні системи рівнянь для лінійної і квадратичної параболи бачимо закономірність нарощування системи рівнянь відносно коефіцієнтів. Тому, щоб отримати систему рівнянь для кубічної параболи до кожного рівняння додаємо ще один доданок за таким принципом: до кінцевого рівняння доданок із сумою $b \sum_{i=1}^n x_i^m$, де $m = 3$ – степінь полінома і кожного наступного рівняння $b \sum_{i=1}^n x_i^{m+1}$ і дописуємо ще одне наступне рівняння

$$b_3 \sum_{i=1}^n x_i^6 + b_2 \sum_{i=1}^n x_i^5 + b_1 \sum_{i=1}^n x_i^4 + b_0 \sum_{i=1}^n x_i^3 = \sum_{i=1}^n y_i x_i^3. \quad (2.26)$$

Визначення коефіцієнтів кореляції.

Для якісних ознак застосовуємо коефіцієнт Пірсона. Коефіцієнт кореляційного відношення Пірсона (парний коефіцієнт кореляції, вибірковий коефіцієнт кореляції) вимірює ступінь лінійного кореляційного зв'язку між кількісними ознаками, тобто встановлює тісноту зв'язку між параметрами x і y та розраховується за виразом [15-19]

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (2.27)$$

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

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}; \quad \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad (2.28)$$

y_i – значення показника механічної властивості чавуну;

$$r = b \frac{\sigma_x^2}{\sigma_y^2}, \quad (2.29)$$

b – коефіцієнт регресії при параметрі x в лінійному рівнянні регресії визначається за МНК [15-19];

σ_x^2 – дисперсія параметра x :

$$\sigma_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n}, \quad (2.30)$$

σ_y^2 – дисперсія параметра y :

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}{n}. \quad (2.31)$$

Для нелінійних залежностей визначали кореляційне відношення за виразом

$$\eta = \frac{\sigma^2(y_{\text{пер}})}{\sigma^2(y)}, \quad (2.32)$$

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

$\sigma^2(y)$ – дисперсія параметра y навколо математичного очікування

$$\sigma^2(y_{\text{per}}) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{\text{per}})^2 \right] - \bar{y}^2; \quad (2.33)$$

$$\sigma^2(y) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right] - \bar{y}^2. \quad (2.34)$$

Для визначання коефіцієнтів парної кореляції за методиками [6, 15] визначали їх статистичну значущість.

Наприклад, парна лінійна регресія.

Випадок для лінійної кореляційної залежності між величинами x і y .

Перевіряємо кореляцію за розрахованим коефіцієнтом кореляції за наступним виразом [15-19]

$$r = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i y_i - \bar{x} \bar{y})}{\sigma_x \cdot \sigma_y}, \quad (2.35)$$

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

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.36)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (2.37)$$

Значення коефіцієнта кореляції при $r = 1$ буде вказувати на наявність лінійного функціонального зв'язку між величинами x і y , а якщо $r > 0,5$, тоді це вказує на помітний лінійний зв'язок величин x і y .

Тому, для оцінювання величин b_1, b_0 у виразу (2.6) використовуємо МНК. Наприклад, вважають, що кращими значеннями параметрів b_1, b_0 будуть такі, для яких сума квадратів відхилень емпіричних значень y_i від розрахункових значень y_p має мінімальне значення [15-19].

Наприклад, перевірку значущості коефіцієнтів регресії виконуємо наступним чином [15-19]:

– визначаємо середньоквадратичне відхилення

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}; \quad (2.38)$$

– визначаємо похибку коефіцієнта b_o

$$\sigma_{b_o} = \sigma_y \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n x_i^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}; \quad (2.39)$$

– визначаємо похибку коефіцієнта b_1 .

$$\sigma_{b_i} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (2.40)$$

Далі значущість коефіцієнтів регресії перевіряємо за допомогою t -критерію Стьюдента [15-19]

$$t_p = \frac{b_i}{\sigma_{b_i}}. \quad (2.41)$$

Розрахувавши теоретичне значення t -критерію Стьюдента порівнюємо його з табличним значенням. Табличне значення t -критерію Стьюдента знаходиться для чисел ступенів вільності $f = N - 1$ та рівня значимості $\alpha = 0,05$.

Якщо $t_p \geq t_{\text{табл.}}$, то тоді коефіцієнти b_i є статистично значимими, а якщо навпаки $t_p \leq t_{\text{табл.}}$, то коефіцієнти – статистично не значимі.

Перевірку на адекватність математичної моделі (рівняння регресії) виконуємо за критерієм Фішера [15-19]

$$F_p = \frac{(n-2) \left(\sum_{i=1}^n y_i^2 \right) - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n y_i \right)^2}{(n-1) \sum_{i=1}^n (y_i - b_1 x - b_o)}. \quad (2.42)$$

Рівняння регресії беремо з виразів (2.2), (2.3), (2.4) і підставляємо їх у вираз (2.42), а дані коефіцієнтів регресії беремо з таблиць обробки даних.

Величина F_p є розподілом Фішера із ступенями вільності $f_1 = n - 1$, $f_2 = n - k$. Потім за таблицями розподілу Фішера при $\alpha = 0,05$ рівні значущості

визначаємо табличне значення $F_{\text{табл.}}$. При $F_p \geq F_{\text{табл.}}$ – неадекватне рівняння регресії, а при $F_p \leq F_{\text{табл.}}$ – рівняння регресії адекватне.

Перевірка на адекватність отриманого рівняння регресії можлива і за наступним виразом [15-19]

$$F_p = \frac{\sigma_{\text{ад.}}^2}{\sigma_{\text{від.}}^2}, \quad (2.43)$$

де $\sigma_{\text{ад.}}^2$ – вибіркова дисперсія адекватності; $\sigma_{\text{від.}}^2$ – вибіркова дисперсія відтворюваності; $f_1 = f_{\text{ад.}}$ – число степенів свободи для $\sigma_{\text{ад.}}^2$; $f_2 = f_{\text{від.}}$ – число степенів свободи для $\sigma_{\text{від.}}^2$.

Дисперсія адекватності і відтворюваності визначається за наступними рівняннями [15-19]:

$$\sigma_{\text{ад.}}^2 = \frac{1}{N-k} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2; \quad (2.44)$$

$$\sigma_{\text{від.}}^2 = \frac{1}{N(n-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2, \quad (2.45)$$

де N – кількість дослідів; n – число вимірювань в досліді; k – число коефіцієнтів в рівнянні регресії; y_i – значення, розраховане за рівнянням регресії для x_i ; y_{ij} – значення параметра оптимізації в j -му вимірюванні i -го досліді; $\bar{y}_i$ – середнє значення величини в i -му досліді; $f_1 = f_{\text{ад.}} = N-k$ – число степенів свободи для дисперсії адекватності; $f_2 = f_{\text{від.}} = N(n-1)$ – число степенів свободи для дисперсії відтворюваності [15-19].

За виразом (2.46) порівнюємо адекватність рівняння регресії за розрахунковим і табличним значенням критерію Фішера [15-19]

$$F_p \leq F_{\text{табл.}(1-\alpha)}(f_1, f_2). \quad (2.46)$$

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ РОЗРАХУНКУ ВЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СІРОГО ЧАВУНУ

3.1. Обробка даних у відповідності з методом найменших квадратів для залежності міцності і твердості від хімічного складу сірого чавуну

Обробка даних, яка проводилась на основі вихідних даних, наведених у (Додатку 2) у відповідності з МНК [15-19] для залежностей міцності від хімічного складу, вуглецевого еквіваленту та степені евтектичності $\sigma_B = f(C)$, $\sigma_B = f(Si)$, $\sigma_B = f(C+Si)$, $\sigma_B = f(Mn)$, $\sigma_B = f(S)$, $\sigma_B = f(C_E)$, $\sigma_B = f(S_E)$ наведена в табл. 3.1–3.21.

Обробка даних у відповідності з МНК [15-19] для залежностей твердості від хімічного складу, вуглецевого еквіваленту та степені евтектичності $HB = f(C)$, $HB = f(Si)$, $HB = f(C+Si)$, $HB = f(Mn)$, $HB = f(S)$, $HB = f(C_E)$, $HB = f(S_E)$ наведена в табл. 3.22–3.42.

Обробка даних у відповідності з МНК [15-19] для залежності міцності від твердості сірого чавуну $\sigma_B = f(HB)$, наведена в табл. 3.43–3.45.

Таблиця 3.1

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(C)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C], % за масою x	$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	$x \cdot y$
1		2	3	4	5	6
1	1	3,10	17,0; 170	9,61	289	52,7
	2	3,12	16,9; 169	9,73	285	52,73
	3	3,15	16,7; 167	9,9	279	52,6
2	1	3,20	16,6 ; 166	10,2	275	53,1
	2	3,23	16,5; 165	10,4	272	53,2
	3	3,27	16,4; 164	10,7	269	53,6

1		2	3	4	5	6
3	1	3,30	16,3 ; 163	10,9	265	53,7
	2	3,33	16,2; 162	11,1	262	53,9
	3	3,36	16,1; 161	11,3	259	54,1
4	1	3,40	16,2; 162	11,5	262	55,1
	2	3,44	16,1; 161	11,8	259	55,3
	3	3,48	16,0; 16,0	12,1	256	55,6
5	1	3,50	15,9; 159	12,2	253	55,65
	2	3,53	15,7; 157	12,4	246	55,4
	3	3,56	15,5; 155	12,6	240	55,18
6	1	3,60	15,4; 154	12,9	237	55,44
	2	3,62	15,3; 153	13,1	234	55,38
	3	3,65	15,2; 152	13,3	231	55,48
7	1	3,66	15,2; 152	13,4	231	55,6
	2	3,68	15,1; 151	13,5	228	55,5
	3	3,70	15,0; 150	13,7	225	55,5
Σ		68,62	367,6	246	5357	1145
$\bar{\mu}_x$		3,27	17,5	11,72	255	54,51

Підставимо в систему рівнянь (2.12) дані з таблиці 3.1.

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=42,85$; $b_1=-7,79$.
За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=35,6 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=6,49 \geq t_{табл.}=2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера за виразом (2.42). Якщо $F_p=1,07 \leq F_{табл.}=2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.2

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(C)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C], % за масою x	$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	$x \cdot y$	$y \cdot x^2$
1	1	3,10	21 ; 210	9,61	29,79	92,3	441	65,1	202
	2	3,12	20 ; 200	9,73	30,35	94,6	400	62,4	194
	3	3,15	19,5; 195	9,9	31,18	98,2	380	61,4	190
2	1	3,20	18,5; 185	10,2	32,0	102	342	59,2	189
	2	3,23	18,1; 181	10,4	33,5	108	327	58,4	188
	3	3,27	17,5; 175	10,7	34,9	114	306	57,2	187
3	1	3,30	17,0; 170	10,9	35,9	118	289	56,1	185
	2	3,33	17,2; 172	11,1	36,9	123	295	57,2	190
	3	3,36	17,4; 174	11,3	38,0	127	302	58,4	196
4	1	3,40	17,5; 175	11,5	39,1	132	306	59,5	201
	2	3,44	17,3; 173	11,8	40,6	139	299	59,5	204
	3	3,48	16,7; 167	12,1	42,1	146	279	58,1	202
5	1	3,50	16,5; 165	12,2	42,8	149	272	57,7	201
	2	3,53	16,3; 163	12,4	43,9	154	265	57,5	202
	3	3,56	16,1; 161	12,6	45,1	160	259	57,3	203
6	1	3,60	16; 160	12,9	46,6	167	256	57,6	206
	2	3,62	15,9; 159	13,1	47,4	171	253	57,5	208
	3	3,65	15,7; 157	13,3	48,6	177	246	57,3	209
7	1	3,66	15,6; 156	13,4	49,0	179	243	57,0	209
	2	3,68	15,5; 155	13,5	49,8	183	240	57,0	209
	3	3,70	15,4; 154	13,7	50,6	187	237	56,9	210
Σ		68,62	345	246	848	2921	6237	1228	4372
$\bar{\mu}_x$		3,27	16,4	11,72	40,4	139	297	58,5	208

Дані з таблиці 3.2 підставляємо в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши систему рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=54,98$; $b_1=15$; $b_2=0,94$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=48,95 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1} = 13,35 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2} = 2,83 \geq t_{табл.}=2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.43)), якщо $F_p=0,87 \leq F_{табл} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.3

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(C)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C], % за масою x	$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	y^2	$x y$	$y x^3$
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	3,10	18,0;180	9,61	29,8	92,3	286	886	324	55,8	536
	2	3,12	18,6;186	9,73	30,3	94,6	295	920	346	58,0	563
	3	3,15	19,1;180	9,9	31,2	98,2	309	973	365	60,1	596
2	1	3,20	19,0;190	10,2	32,0	102	326	1043	361	60,8	608
	2	3,23	19,3;193	10,4	33,5	108	385	1243	372	62,3	646
	3	3,27	19,5;195	10,7	34,9	114	373	1219	380	63,7	675
3	1	3,30	19,4;194	10,9	35,9	118	389	1283	376	64,0	696
	2	3,33	19,2;192	11,1	36,9	123	409	1362	368	63,9	708
	3	3,36	19,0;190	11,3	38,0	127	427	1435	361	63,8	772
4	1	3,40	18,7;187	11,5	39,1	132	449	1526	349	63,5	731
	2	3,44	18,5;185	11,8	40,6	139	478	1644	342	63,6	751
	3	3,48	18,0;180	12,1	42,1	146	508	1767	324	62,6	758
5	1	3,50	17,9;179	12,2	42,8	149	521	1823	320	62,65	766
	2	3,53	16,5;165	12,4	43,9	154	543	1917	272	58,2	724
	3	3,56	15,1;151	12,6	45,1	160	569	2025	228	53,7	681

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	1	3,60	15,2;152	12,9	46,6	167	601	2163	231	53,2	708
	2	3,62	15,3;153	13,1	47,4	171	619	2241	234	54,7	725
	3	3,65	15,5;155	13,3	48,6	177	646	2358	240	56,57	753
7	1	3,66	15,4;154	13,4	49,0	179	655	2397	237	56,3	754
	2	3,68	15,2;152	13,5	49,8	183	673	2476	231	55,9	757
	3	3,70	15,0;150	13,7	50,6	187	692	2560	225	55,5	759
Σ		68,6	367	246	848	2921	2917	35261	6166	6990	14677
μ _x		3,27	17,5	11,7	40,4	139	411	1679	293	333	1222

Підставляємо в систему рівнянь (2.25) дані з таблиці 3.3.

Після розв'язання системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 22,99$; $b_1 = 16$; $b_2 = -7,88$; $b_3 = 0,98$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 18,39 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 12,8 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 6,3 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p3} = 2,7 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$ коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера (вираз (2.42)). Якщо $F_p = 0,031 \leq F_{\text{табл.}} = 2,2$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.4

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(\text{Si})$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Si], % за масою x	$[\sigma_b]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	xy
1		2	3	4	5	6
1	1	1,90	15,0 ; 150	3,6	225	28,5
	2	1,93	14,9 ; 149	3,7	222	28,7
	3	1,97	14,8 ; 147	3,8	219	29,1
2	1	2,0	14,8 ; 148	4,0	219	29,6
	2	2,05	14,7; 147	4,2	216	30,1
	3	2,08	14,6; 146	4,3	213	30,3

1		2	3	4	5	6
3	1	2,1	14,5; 145	4,4	210	30,45
	2	2,14	14,4; 144	4,6	207	30,8
	3	2,17	14,2; 142	4,7	201	30,8
4	1	2,2	13,8; 138	4,8	190	30,36
	2	2,22	13,6; 136	4,9	185	30,2
	3	2,28	13,5; 135	5,2	182	30,7
5	1	2,3	12,7; 127	5,3	161	29,2
	2	2,32	12,9; 129	5,4	166	29,9
	3	2,37	12,6; 126	5,6	159	29,8
6	1	2,40	13,0; 130	5,7	169	31,2
	2	2,42	12,5; 125	5,8	156	30,2
	3	2,44	10,5; 105	5,9	110	25,6
7	1	2,46	11,0; 110	6,0	121	27,0
	2	2,48	10,5; 105	6,1	110	26,0
	3	2,5	10,0; 100	6,3	100	25,0
Σ		46,73	391	104	3744	613
$\bar{\mu}_x$		2,22	18,6	4,9	312	29,2

Дані з таблиці 3.4 підставимо в систему рівнянь (2.12).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=18$; $b_1=-1,72$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 9,62 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,9 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.42) при $F_p = 1,12 \leq F_{табл} = 2,1$ рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.5

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(\text{Si})$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Si], % за масою x	$[\sigma_b]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	$x \cdot y$	yx^2
1	1	1,90	14,9; 149	3,6	6,85	13,0	225	28,3	53,6
	2	1,93	14,7; 147	3,7	7,18	13,8	216	28,4	54,4
	3	1,97	14,4; 144	3,8	7,64	15,0	207	28,3	54,7
2	1	2,0	14,0; 140	4,0	8,0	16,0	196	28,0	56,0
	2	2,05	13,8; 130	4,2	8,61	17,6	190	28,2	57,9
	3	2,08	13,6 ; 159	4,3	8,99	18,7	185	28,3	58,5
3	1	2,1	13,8; 138	4,4	9,26	19,4	190	28,9	60,7
	2	2,14	13,8; 133	4,6	9,80	20,9	190	29,5	63,5
	3	2,17	13,7; 159	4,7	10,2	22,1	187	29,7	64,4
4	1	2,2	13,6; 136	4,8	10,64	23,4	185	29,9	65,3
	2	2,22	13,4; 134	4,9	10,64	23,6	179	29,9	65,6
	3	2,28	13,2; 132	5,2	11,85	27,0	174	30,0	68,6
5	1	2,30	12,9; 129	5,3	12,16	27,9	166	29,6	68,4
	2	2,32	12,7; 127	5,4	12,16	28,2	161	29,4	68,6
	3	2,37	12,6; 126	5,6	13,31	31,5	158	29,8	70,5
6	1	2,40	12,5; 125	5,7	13,82	33,2	156	30,0	71,2
	2	2,42	12,0; 120	5,8	14,17	34,3	144	29,0	69,6
	3	2,44	11,6; 116	5,9	14,52	35,4	134	28,3	68,4
7	1	2,46	11,3; 113	6,0	15,62	38,4	127	27,7	67,8
	2	2,48	10,8; 108	6,1	15,25	37,8	116	26,7	65,8
	3	2,5	10,5; 105	6,3	16,6	41,5	110	26,2	66,1
Σ		46,73	274	104	1155	538	3596	604	1339
$\bar{\mu}_x$		2,22	22,8	4,9	54,9	44,8	171	28,7	63,8

Підставимо в систему рівнянь (2.23) дані з таблиці 3.5.

Після розв'язання системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 20,1$; $b_1 = 3,34$; $b_2 = 0,45$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 15,95 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,65 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 2,3 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за t -критерієм Фішера за виразом (2.43). Якщо $F_{p.} = 0,73 \leq F_{табл.} = 2,1$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.6

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_{\epsilon} = f(Si)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Si], % за масою x	$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	y^2	yx	yx^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1	1,90	15,9; 159	3,6	6,85	13,0	24,7	46,9	253	30,2	108
	2	1,93	15,2; 152	3,7	7,18	13,8	26,6	51,3	231	29,3	109
	3	1,97	14,3; 143	3,8	7,64	15,0	29,5	58,1	204	28,2	109
2	1	2,0	13,0; 130	4,0	8,0	16,0	32,0	64,0	169	26,0	104
	2	2,05	13,1; 131	4,2	8,61	17,6	44,0	90,2	172	26,8	113
	3	2,08	13,2; 132	4,3	8,99	18,7	38,8	80,7	174	27,4	118
3	1	2,1	13,3; 133	4,4	9,26	19,4	40,7	85,5	177	27,9	123
	2	2,14	13,4; 134	4,6	9,80	20,9	44,7	95,6	179	28,6	131
	3	2,17	13,5; 135	4,7	10,2	22,1	47,9	104	182	29,3	137
4	1	2,2	13,5; 135	4,8	10,6	23,4	51,5	113	182	29,7	143
	2	2,22	12,8; 128	4,9	10,6	23,6	52,4	116	164	28,4	135
	3	2,28	12,2; 122	5,2	11,8	27,0	61,5	140	149	27,8	144
5	1	2,3	12,6; 126	5,3	12,1	27,9	64,1	147	158	28,9	152
	2	2,32	12,3; 123	5,4	12,1	28,2	65,4	152	151	28,5	148
	3	2,37	11,6; 116	5,6	13,3	31,5	74,6	177	134	27,5	154
6	1	2,40	10,5; 105	5,7	13,8	33,2	79,7	191	110	25,2	145
	2	2,42	10,4; 104	5,8	14,1	34,3	83,0	200	108	25,2	146
	3	2,44	10,3; 103	5,9	14,5	35,4	86,3	210	106	25,1	149

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	1	2,46	10,2; 102	6,0	15,6	38,4	94,4	232	104	25,1	159
	2	2,48	10,1; 101	6,1	15,2	37,8	93,7	232	102	25,0	153
	3	2,5	10; 100	6,3	16,6	41,5	104	260	100	25,0	166
Σ		46,73	275	104	1155	538	1239	2614	3309	548	2846
μ _x		2,22	22,89	4,9	54,9	44,8	59,0	124	157	26,1	135

Дані з таблиці 3.6 підставляємо в систему рівнянь (2.25).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 3,45$; $b_1 = 20,73$; $b_2 = -10,98$; $b_3 = 1,97$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 2,71 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 16,32 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 9,64 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p3} = 2,55 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$ коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.42)), якщо $F_p = 0,48 \leq F_{\text{табл.}} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.7

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(C+Si)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п	[C+Si], % за масою		[σ_b], кг/мм ² ; МПа		x^2	y^2	$x \cdot y$
	x		y				
1	2	3	4	5	6		
1	1	5,10	15,0; 150	26,1	225	76,5	
	2	5,17	14,8; 148	26,7	219	76,5	
	3	5,24	14,5; 145	27,4	210	75,9	
2	1	5,30	14,3; 143	28,1	204	75,8	
	2	5,39	14,1; 141	29,0	207	75,9	
	3	5,46	13,5; 135	29,8	182	73,7	
3	1	5,50	13,8; 138	30,2	190	75,9	
	2	5,58	13,6; 136	31,1	185	75,8	
	3	5,65	13,5; 134	31,9	182	76,2	

1		2	3	4	5	6
4	1	5,70	13,3; 162	32,5	177	75,8
	2	5,76	13,2; 132	33,1	174	76,0
	3	5,84	13,1; 131	34,1	171	76,5
5	1	5,90	13,0; 159	34,8	169	76,7
	2	5,95	12,6; 126	35,4	158	74,9
	3	6,0	12,2; 122	36,0	149	73,2
6	1	6,10	11,0; 110	37,2	121	67,1
	2	6,15	10,9; 109	37,8	118	67,0
	3	6,18	10,7; 107	38,2	114	66,1
7	1	6,23	10,5; 105	38,8	110	65,4
	2	6,27	10,3; 103	39,3	106	64,6
	3	6,30	10,0; 100	39,7	100	63,0
Σ		120,7	377	969	3471	1528
$\bar{\mu}_x$		5,75	17,9	46,14	165	72,7

Підставляємо в систему рівнянь (2.12) дані з таблиці 3.7.

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 28,34$; $b_1 = 2,57$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 34,98 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 3,17 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера (вираз (2.42)). Якщо $F_p = 0,78 \leq F_{табл} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.8

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(C+Si)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/П		[C+Si], % за масою x	$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	xy	yx^2
1		2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	5,10	20,7; 207	26,1	133	678	429	105	540
	2	5,17	20,5; 205	26,7	138	713	420	106	547
	3	5,24	20,1; 210	27,4	143	749	404	105	551

1		2	3	4	5	6	7	8	9
2	1	5,30	19,4; 194	28,1	149	789	376	103	545
	2	5,39	19,3; 193	29,0	156	840	372	104	559
	3	5,46	19,1; 191	29,8	163	889	365	104	569
3	1	5,50	18,8; 188	30,2	166	913	353	103	567
	2	5,58	18,2; 182	31,1	173	965	331	101	566
	3	5,65	17,8; 178	31,9	175	988	317	100	567
4	1	5,70	17,5; 175	32,5	185	1054	306	99,7	568
	2	5,76	18,0; 180	33,1	190	1094	324	103	595
	3	5,84	18,5; 185	34,1	199	1162	342	108	631
5	1	5,90	18,8; 188	34,8	205	1209	353	110	654
	2	5,95	18,4; 184	35,4	210	1249	338	109	651
	3	6,0	18,0; 180	36,0	216	1296	324	108	648
6	1	6,10	17,7; 177	37,2	227	1384	313	108	658
	2	6,15	17,5; 175	37,8	232	1426	306	107	661
	3	6,18	17,2; 171	38,2	236	1458	295	106	657
7	1	6,23	17,0; 170	38,8	242	1507	289	106	659
	2	6,27	16,8; 168	39,3	246	1542	282	105	660
	3	6,30	16,5; 165	39,7	250	1575	277	103	655
Σ		120,7	386	969	4034	23480	7116	2203	12408
μ _x		5,75	18,37	46,14	192	1118	338	105	591

Дані з таблиці 3.8 підставимо в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=70,21$; $b_1=-15,87$; $b_2=1,21$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=92,38 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=20,88 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2}=2,6 \geq t_{табл.}=2,08$ коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.43) при $F_p=0,061 \leq F_{табл.}=2,0$ рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.9

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(C+Si)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C+Si], % за масою x	$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	y^2	xy	yx^3
1	1	5,10	19,0; 190	26,1	133	678	3457	17630	361	96,9	2527
	2	5,17	19,3; 192	26,7	138	713	3686	19056	372	99,7	2663
	3	5,24	19,6; 196	27,4	143	749	3924	20561	384	103	2802
2	1	5,30	20,0; 200	28,1	149	789	4181	22189	400	106	2980
	2	5,39	19,8; 198	29,0	156	840	4527	24400	392	106	3088
	3	5,46	19,5; 195	29,8	163	889	4853	26497	380	106	3178
3	1	5,50	19,2; 192	30,2	166	913	5021	27615	368	105	3178
	2	5,58	18,8; 188	31,1	173	965	5384	30042	353	104	3252
	3	5,65	18,3; 183	31,9	175	988	5582	31538	335	103	3202
4	1	5,70	18,0; 180	32,5	185	1054	6007	34239	324	102	3330
	2	5,76	17,7; 177	33,1	190	1094	6301	36293	313	101	3363
	3	5,84	17,2; 172	34,1	199	1162	6786	39630	295	100	3422
5	1	5,90	16,8; 168	34,8	205	1209	7149	42179	282	99,1	3444
	2	5,95	16,4; 164	35,4	210	1249	7431	44214	268	97,5	3444
	3	6,0	15,9; 159	36,0	216	1296	7776	46656	253	95,4	3434
6	1	6,10	15,3; 153	37,2	227	1384	8442	51496	234	93,3	3473
	2	6,15	14,9; 149	37,8	232	1426	8769	53929	222	91,6	3456
	3	6,18	14,7; 147	38,2	236	1458	9010	55681	216	90,8	3469
7	1	6,23	14,5; 145	38,8	242	1507	9388	58487	210	93,4	3509
	2	6,27	14,3; 143	39,3	246	1542	9668	60618	204	89,6	3517
	3	6,30	14,1; 141	39,7	250	1575	9922	62508	198	88,8	3525
Σ		120,7	363	969	4034	23480	137264	805458	6164	2072	65078
$\bar{\mu}_x$		5,75	17,3	46,2	192	1118	6536	38355	293	98,6	3098

Виконаємо підстановку даних з таблиці 3.9 в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 69,72$; $b_1 = 16,86$; $b_2 = 1,31$; $b_3 = 0,0045$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} =$

$98,18 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p1} = 23,74 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p2} = 2,84 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p2} = 2,17 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за виразом (2.42). Якщо $F_p=0,014 \leq F_{\text{табл.}} = 2,2$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.10

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(Mn)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Mn], % за масою x	$[\sigma_b]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	$x \cdot y$
1	1	0,45	13,0; 130	0,20	169	5,85
	2	0,47	13,2; 132	0,22	174	6,20
	3	0,49	13,4; 134	0,24	179	6,56
2	1	0,50	13,5; 135	0,25	182	6,75
	2	0,52	13,7; 137	0,27	187	7,12
	3	0,54	13,9; 139	0,29	193	7,50
3	1	0,55	14,0; 140	0,30	196	7,70
	2	0,57	14,2; 142	0,30	201	8,09
	3	0,59	14,3; 143	0,35	204	8,43
4	1	0,60	14,4; 144	0,36	207	8,64
	2	0,62	14,6; 146	0,38	213	9,05
	3	0,64	14,7; 147	0,41	216	9,41
5	1	0,65	14,8; 148	0,42	219	9,62
	2	0,67	14,7; 147	0,44	216	9,84
	3	0,68	14,6; 146	0,46	213	9,93
6	1	0,70	14,6; 146	0,49	213	10,22
	2	0,71	14,7; 147	0,50	216	10,43
	3	0,72	14,7; 147	0,51	216	10,58
7	1	0,73	14,8; 148	0,53	219	10,80
	2	0,74	14,9; 149	0,54	222	11,02
	3	0,75	15,0; 150	0,56	225	11,25
Σ		12,89	299	8,02	4280	183
$\bar{\mu}_x$		0,61	14,3	0,38	204	8,76

Підставимо в систему рівнянь (2.12) дані з таблиці 3.10.

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 12,78$; $b_1 = 2,11$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 2,46 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,15 \geq t_{табл.} = 2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за t -критерієм Фішера за виразом (2.42). Якщо $F_p = 0,30 \leq F_{табл} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.11

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(Mn)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2 x^2 + b_1 x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Mn], % за масою x	$[\sigma_b]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	xy	yx^2
1		2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	0,45	14,2; 142	0,20	0,09	0,04	201	6,39	2,84
	2	0,47	14,0; 140	0,22	0,10	0,05	196	6,58	3,08
	3	0,49	13,9; 139	0,24	0,11	0,05	193	6,81	3,33
2	1	0,50	13,8; 138	0,25	0,12	0,06	190	6,90	3,45
	2	0,52	14,1; 141	0,27	0,14	0,07	198	7,33	3,80
	3	0,54	14,3; 143	0,29	0,15	0,08	204	7,72	4,14
3	1	0,55	14,5; 145	0,30	0,16	0,08	210	7,97	4,35
	2	0,57	14,6; 146	0,30	0,17	0,09	213	8,32	4,38
	3	0,59	14,7; 147	0,35	0,20	0,12	216	8,67	5,14
4	1	0,60	14,8; 148	0,36	0,21	0,13	219	8,88	5,32
	2	0,62	14,7; 147	0,38	0,23	0,14	216	9,11	5,58
	3	0,64	14,6; 146	0,41	0,26	0,16	213	9,34	5,98
5	1	0,65	14,5; 145	0,42	0,27	0,17	210	9,42	6,09
	2	0,67	14,7; 147	0,44	0,29	0,19	216	9,85	6,46
	3	0,68	14,9; 149	0,46	0,31	0,21	222	10,1	6,85
6	1	0,70	15,0; 150	0,49	0,34	0,24	225	10,5	7,35
	2	0,71	15,5; 155	0,50	0,35	0,25	240	11,00	7,75
	3	0,72	15,8; 158	0,51	0,36	0,26	249	11,37	8,05

1		2	3	4	5	6	7	8	9
7	1	0,73	16,4; 164	0,53	0,42	0,30	268	11,97	8,69
	2	0,74	16,7; 167	0,54	0,39	0,29	279	12,35	9,02
	3	0,75	17,0; 170	0,56	0,42	0,31	289	12,75	9,52
Σ		12,89	594	8,02	5,09	329	4667	193	113
$\bar{\mu}_x$		0,61	28,3	0,38	0,24	0,16	222	9,20	5,38

Дані з таблиці 3.11 підставляємо в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 13,73$; $b_1 = -0,009$; $b_2 = 1,043$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 2,33 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,16 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 2,1 \geq t_{табл.} = 2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.43)), якщо $F_p = 1,8 \leq F_{табл.} = 2,1$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.12

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(Mn)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Mn], % за масою x	$[\sigma_b]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	xy	y^2	yx^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1	0,45	12,5; 125	0,20	0,09	0,04	0,018	0,0081	5,62	156	1,12
	2	0,47	12,3; 123	0,22	0,10	0,05	0,023	0,011	5,78	151	1,23
	3	0,49	12,1; 121	0,24	0,11	0,05	0,024	0,012	5,93	146	1,33
2	1	0,50	12,0; 120	0,25	0,12	0,06	0,030	0,015	6,0	144	1,44
	2	0,52	11,9; 119	0,27	0,14	0,07	0,036	0,019	6,18	141	1,66
	3	0,54	11,8; 118	0,29	0,15	0,08	0,043	0,023	6,37	139	1,77
3	1	0,55	12,3; 123	0,30	0,16	0,08	0,044	0,024	6,76	151	1,96
	2	0,57	12,9; 129	0,30	0,17	0,09	0,051	0,029	7,35	166	2,19
	3	0,59	13,7; 137	0,35	0,20	0,12	0,071	0,041	8,08	187	2,74

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
4	1	0,60	14,3; 143	0,36	0,21	0,13	0,078	0,047	8,58	204	3,00
	2	0,62	14,5; 145	0,38	0,23	0,14	0,086	0,053	8,99	210	3,33
	3	0,64	15,3; 153	0,41	0,26	0,16	0,102	0,065	9,79	234	3,97
5	1	0,65	15,6; 156	0,42	0,27	0,17	0,111	0,072	10,1	243	4,21
	2	0,67	15,7; 157	0,44	0,29	0,19	0,121	0,081	10,5	246	4,55
	3	0,68	15,9; 159	0,46	0,31	0,21	0,143	0,097	10,8	252	4,92
6	1	0,70	16; 160	0,49	0,34	0,24	0,168	0,134	11,2	256	5,44
	2	0,71	16,9;169	0,50	0,35	0,25	0,177	0,125	11,9	285	5,91
	3	0,72	17,8;178	0,51	0,36	0,26	0,187	0,134	12,9	316	6,41
7	1	0,73	18,6;186	0,53	0,42	0,30	0,219	0,159	13,6	346	7,81
	2	0,74	18,8;188	0,54	0,39	0,29	0,214	0,158	13,9	353	7,33
	3	0,75	19,0;190	0,56	0,42	0,31	0,232	0,174	14,2	361	7,98
Σ		12,89	310	8,02	5,09	329	220	1,481	194	3627	80,3
$\bar{\mu}_x$		0,61	14,7	0,38	0,24	0,16	10,5	0,070	9,26	173	3,82

Підставляємо в систему рівнянь (2.25) дані з таблиці 3.12.

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 11,35$; $b_1 = 7,63$; $b_2 = -6,52$; $b_3 = 2,27$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 2,11 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,4 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 2,2 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 2,12 \geq t_{табл.} = 2,08$ коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера (вираз (2.42)). Якщо $F_p = 2,0 \leq F_{табл} = 2,2$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.13

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_v = f(S)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п	[S], % за масою x		[σ_v], кг/мм ² ; МПа y		x^2	y^2	xy
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,02	10 ; 100	0,0004	100	0,20	
	2	0,025	10,2; 102	0,0006	104	0,25	
	3	0,03	10,4; 104	0,0009	108	0,31	

1		2	3	4	5	6
2	1	0,04	10,5; 105	0,0016	110	0,42
	2	0,045	10,7; 107	0,0020	114	0,48
	3	0,050	10,9; 109	0,0025	118	0,54
3	1	0,06	11,0; 110	0,0036	121	0,66
	2	0,065	11,5; 115	0,0042	132	0,74
	3	0,07	12,1; 121	0,0049	146	0,85
4	1	0,08	12,4; 124	0,0064	153	0,99
	2	0,085	12,6; 126	0,0072	158	1,07
	3	0,09	13,0; 130	0,0081	169	1,17
5	1	0,10	13,4; 134	0,010	179	1,34
	2	0,105	13,7; 137	0,011	187	1,44
	3	0,11	14,1; 141	0,012	198	1,55
6	1	0,12	14,3; 143	0,014	204	1,71
	2	0,125	14,6; 146	0,015	213	1,82
	3	0,13	14,8; 148	0,016	219	1,92
7	1	0,132	15,0; 150	0,017	225	1,98
	2	0,136	15,2; 152	0,018	231	2,06
	3	0,14	15,4; 154	0,019	237	2,15
Σ		1,76	266	0,313	3426	23,65
$\bar{\mu}_x$		0,08	12,65	0,045	163	1,126

Дані з таблиці 3.13 підставимо в систему рівнянь (2.12).

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 11,25$; $b_1 = 26,19$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 3,0 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,2 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.43) рівняння регресії адекватне при $F_p = 0,46 \leq F_{табл} = 2,1$.

Таблиця 3.14

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(S)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[S], % за масою x	$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	xy	yx^2
1	1	0,02	10; 100	0,0004	0,000008	0,00000016	100	0,20	0,004
	2	0,025	10,1;101	0,0006	0,000015	0,00000037	102	0,25	0,006
	3	0,03	10,3;103	0,0009	0,000027	0,00000081	106	0,31	0,009
2	1	0,04	10,5;105	0,0016	0,000064	0,00000025	110	0,42	0,016
	2	0,045	10,7;107	0,0020	0,000091	0,00000041	114	0,48	0,021
	3	0,050	10,9;109	0,0025	0,000125	0,00000062	118	0,54	0,027
3	1	0,06	11 ; 110	0,0036	0,000216	0,0000129	121	0,66	0,039
	2	0,065	11,4;114	0,0042	0,000270	0,0000175	129	0,74	0,047
	3	0,07	11,9;119	0,0049	0,000343	0,000024	141	0,83	0,058
4	1	0,08	12,5;125	0,0064	0,000512	0,000041	156	1,00	0,080
	2	0,085	12,7;127	0,0072	0,000614	0,000052	161	1,10	0,091
	3	0,09	12,9;129	0,0081	0,000729	0,000065	166	1,16	0,104
5	1	0,10	13,8;138	0,010	0,00100	0,0001	190	1,38	0,138
	2	0,105	14,0;140	0,011	0,00115	0,00012	196	1,47	0,154
	3	0,11	14,2;142	0,012	0,00133	0,00014	201	1,56	0,170
6	1	0,12	14,5;145	0,014	0,00172	0,00020	210	1,74	0,20
	2	0,125	14,7;147	0,015	0,00195	0,00024	216	1,83	0,22
	3	0,13	15,0;150	0,016	0,00219	0,00028	225	1,95	0,24
7	1	0,132	15,2;152	0,017	0,00229	0,00030	231	2,00	0,25
	2	0,136	15,4;154	0,018	0,00251	0,00034	237	2,09	0,27
	3	0,14	15,6;156	0,019	0,00274	0,00038	243	2,18	0,29
Σ		1,76	252	0,313	0,0347	0,000424	3473	22,9	2,43
$\bar{\mu}_x$		0,08	12	0,045	0,00016	0,000020	165	1,09	0,115

Підставимо в систему рівнянь (2.23) дані з таблиці 3.14.

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 13,72$; $b_1 = -15,85$; $b_2 = 171,72$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 2,34 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 2,15 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 5,0 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за виразом (2.43). Рівняння регресії адекватне, якщо $F_{p.} = 0,091 \leq F_{\text{табл.}} = 2,1$.

Таблиця 3.15

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_v = f(S)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[S], % за масою x	$[\sigma_v]$, кг/м м ² y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	xy	y^2	yx^3
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1	1	0,02	14,0	$4 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-11}$	0,2	196	$1,2 \cdot 10^{-6}$
	2	0,02	14,2	$6 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	$3,7 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$1,4 \cdot 10^{-10}$	0,3	201	$2 \cdot 10^{-4}$
	3	0,03	14,3	$9 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$8,1 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-8}$	$6 \cdot 10^{-10}$	0,4	204	$3 \cdot 10^{-4}$
2	1	0,04	14,5	$1 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-5}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	$1 \cdot 10^{-8}$	$4 \cdot 10^{-10}$	0,5	210	$9 \cdot 10^{-4}$
	2	0,04	14,5	$2 \cdot 10^{-3}$	$9,1 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-9}$	0,6	210	$1 \cdot 10^{-3}$
	3	0,05	14,6	$2 \cdot 10^{-3}$	$12,5 \cdot 10^{-5}$	$6,2 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-7}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	0,7	213	$2 \cdot 10^{-3}$
3	1	0,06	14,8	$3 \cdot 10^{-3}$	$21,6 \cdot 10^{-5}$	$1,29 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-7}$	$4 \cdot 10^{-8}$	0,8	219	$3 \cdot 10^{-3}$
	2	0,06	15,0	$4 \cdot 10^{-3}$	$27,0 \cdot 10^{-5}$	$1,75 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-7}$	0,9	225	$4 \cdot 10^{-3}$
	3	0,07	15,2	$4 \cdot 10^{-3}$	$34,3 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-7}$	1,0	231	$5 \cdot 10^{-3}$
4	1	0,08	15,6	$6 \cdot 10^{-3}$	$51,2 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	1,2	243	$7 \cdot 10^{-3}$
	2	0,08	15,9	$7 \cdot 10^{-3}$	$61,4 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	1,2	252	$9 \cdot 10^{-3}$
	3	0,09	16,7	$8 \cdot 10^{-3}$	$72,9 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	1,5	278	0,01
5	1	0,10	17,0	0,010	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	1,7	289	0,017
	2	0,10	17,5	0,011	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	1,7	305	0,026
	3	0,11	18,6	0,012	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	2,0	346	0,024
6	1	0,12	18,7	0,014	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	2,2	349	0,032
	2	0,12	18,9	0,015	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	2,3	357	0,035
	3	0,13	19,0	0,016	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	2,4	361	0,04

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	1	0,13	19,1	0,017	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	2,5	365	0,04
	2	0,13	19,3	0,018	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	2,5	372	0,05
	3	0,14	19,5	0,019	$2,74 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	2,7	380	0,05
Σ		1,76	347	0,313	$34,7 \cdot 10^{-3}$	$4,24 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	29	5806	0,349
μ _x		0,08	16,5	0,045	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	1,4	276	0,016

Проведемо підстановку даних з таблиці 3.15 в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 13,71$; $b_1 = 12,65$; $b_2 = -192,42$; $b_3 = 324,1$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 3,22 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 3,47 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 4,36 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p3} = 7,36 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за t -критерієм Фішера за виразом (2.42). Якщо $F_p = 2 \cdot 10^{-6} \leq F_{табл} = 2,0$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.16

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(C_E)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/П		$[C_E], \%$ за масою x	$[\sigma_B], \text{кг/мм}^2$; МПа y	x^2	y^2	$x \cdot y$
1	2	3	4	5	6	
1	1	3,6	20,6; 206	12,9	424	74,16
	2	3,65	20,4; 204	13,3	416	74,46
	3	3,68	20,3; 203	13,5	412	74,7
2	1	3,7	20,2; 202	13,6	408	74,74
	2	3,73	20,1; 201	13,9	404	74,9
	3	3,76	20,0; 200	14,1	400	75,2
3	1	3,8	19,9; 199	14,4	396	75,6
	2	3,84	19,7; 197	14,7	388	75,6
	3	3,87	19,6; 196	14,9	384	75,8

1		2	3	4	5	6
4	1	3,9	19,5; 195	15,2	380	76,0
	2	3,95	19,4; 194	15,6	376	76,63
	3	3,97	19,3; 193	15,7	372	76,62
5	1	4,0	19,1; 191	16,0	364	76,4
	2	4,05	19,0; 190	16,4	361	76,9
	3	4,08	18,9; 189	16,6	357	77,1
6	1	4,1	18,8; 188	16,8	353	77,0
	2	4,12	18,7; 187	16,9	349	77,0
	3	4,15	18,5; 185	17,2	342	76,77
7	1	4,17	18,4; 184	17,4	338	76,7
	2	4,19	18,3; 183	17,5	335	76,67
	3	4,22	18,2; 182	17,8	331	76,80
Σ		82,53	407	34	7901	1595
$\bar{\mu}_x$		3,93	19,4	15,44	376	75,99

Підставимо в систему рівнянь (2.12) дані з таблиці 3.16.

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 44,85$; $b_1 = 6,68$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 40,7 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 6,16 \geq t_{табл.} = 2,08$ коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.42)) рівняння регресії адекватне, якщо $F_{p.} = 1,4 \leq F_{табл.} = 2,1$.

Таблиця 3.17

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(C_E)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2 x^2 + b_1 x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		$[C_E], \%$ за масою x	$[\sigma_b], \text{кг/мм}^2$; МПа y	x^2	x^3	x^4	xy	y^2	yx^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	3,6	18,2; 182	12,9	46,6	167,7	65,52	331	235
	2	3,65	17,9; 179	13,3	48,6	177,4	65,33	320	238
	3	3,68	17,5; 175	13,5	49,8	183,2	64,4	306	236

1		2	3	4	5	6	7	8	9
2	1	3,7	17,1; 171	13,6	50,6	187,2	63,27	292	232
	2	3,73	16,8; 168	13,9	51,8	193,2	62,66	282	233
	3	3,76	16,5; 165	14,1	53,1	199,6	62,04	272	232
3	1	3,8	16,7; 167	14,4	54,8	215,1	63,46	278	240
	2	3,84	16,5; 165	14,7	56,6	217,3	63,36	272	242
	3	3,87	16,9; 169	14,9	57,9	224,1	65,40	285	252
4	1	3,9	17,5; 175	15,2	59,3	231,2	68,25	306	266
	2	3,95	17,1; 171	15,6	61,6	243,3	67,54	292	266
	3	3,97	16,8; 168	15,7	62,6	248,5	66,69	282	264
5	1	4,0	16,4; 164	16,0	64,0	256	65,6	269	262
	2	4,05	16,2; 162	16,4	66,4	268,9	65,6	262	265
	3	4,08	15,8; 158	16,6	67,9	277	64,46	249	262
6	1	4,1	15,4; 154	16,8	68,9	282,4	63,14	237	258
	2	4,12	15,6;156	16,9	69,6	286,7	64,42	243	263
	3	4,15	15,2;152	17,2	71,4	296,3	63,08	231	261
7	1	4,17	15,0;150	17,4	72,5	302,3	62,55	225	261
	2	4,19	14,8;148	17,5	73,5	307,9	62,01	219	259
	3	4,22	14,6;146	17,8	75,1	316,9	61,61	213	260
Σ		82,53	344	324	1282	5082	1350	5404	4760
μ _x		3,93	16,4	15,44	61	242	64,3	257	226

Дані з таблиці 3.17 підставляємо в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 105$; $b_1 = -36,10$; $b_2 = 3,28$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 113 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 38,81 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 3,52 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$ коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера (вираз (2.43)). Якщо $F_p = 0,23 \leq F_{\text{табл.}} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.18

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(C_E)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C _E], % за масою x	[σ _B], кг/мм ² ; МПа y	x ²	x ³	x ⁴	x ⁵	x ⁶	xy	y ²	yx ³
1	1	3,6	22,0; 220	12,9	46,6	167	604	2174	79,2	484	1025
	2	3,65	21,6; 216	13,3	48,6	177	643	2347	78,8	466	1049
	3	3,68	20,4; 207	13,5	49,8	183	674	2480	75,0	416	1015
2	1	3,7	19,5; 195	13,6	50,6	187	692	2560	72,1	380	986
	2	3,73	19,7; 197	13,9	51,8	193	720	2685	73,5	388	1020
	3	3,76	19,8; 198	14,1	53,1	199	750	2820	74,4	392	1051
3	1	3,8	19,9; 199	14,4	54,8	215	817	3104	75,6	396	1090
	2	3,84	19,7; 197	14,7	56,6	217	833	3198	75,6	388	1115
	3	3,87	19,2; 192	14,9	57,9	224	866	3351	74,3	368	1116
4	1	3,9	18; 180	15,2	59,3	231	900	3510	70,2	324	1067
	2	3,95	18,6; 186	15,6	61,6	243	959	3788	73,4	346	1145
	3	3,97	19,7; 197	15,7	62,6	248	984	3906	78,2	388	1233
5	1	4,0	20,2; 202	16,0	64,0	256	1024	4096	80,8	408	1293
	2	4,05	20,1; 201	16,4	66,4	268	1085	4394	81,4	404	1334
	3	4,08	19,1; 191	16,6	67,9	277	1130	4610	77,9	365	1268
6	1	4,1	19,4; 193	16,8	68,9	282	1156	4739	79,5	376	1336
	2	4,12	19,3; 192	16,9	69,6	286	1178	4853	79,5	372	1343
	3	4,15	19,2; 192	17,2	71,4	296	1228	5096	79,6	368	1371
7	1	4,17	19,1; 191	17,4	72,5	302	1259	5250	79,6	365	1384
	2	4,19	19,0; 190	17,5	73,5	307	1286	5388	79,6	361	1396
	3	4,22	18,9; 189	17,8	75,1	316	1333	5625	79,7	357	1419
Σ		82,5	412	324	1282	5082	20122	79974	1538	7708	21970
$\bar{\mu}_x$		3,93	19,6	15,4	61	242	985	3808	73,2	367	1046

Підставляємо в систему рівнянь (2.25) дані з таблиці 3.18.

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 71,89$; $b_1 = -14,98$; $b_2 = -0,52$; $b_3 = 0,23$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 64,18 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 13,37 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 2,15 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 4,8 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$ коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.42), якщо $F_p = 0,26 \leq F_{\text{табл.}} = 2,2$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.19

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(S_E)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		$[S_E]$, % за масою x	$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	xy
1		2	3	4	5	6
1	1	0,75	20,7; 207	0,56	428	15,52
	2	0,77	20,6; 206	0,59	424	15,86
	3	0,79	20,5; 205	0,62	420	16,19
2	1	0,80	20,4; 204	0,64	410	16,56
	2	0,82	20,2; 202	0,67	408	16,56
	3	0,84	20,0; 200	0,71	400	16,8
3	1	0,85	19,8; 198	0,72	392	16,83
	2	0,87	19,7; 197	0,75	388	17,22
	3	0,89	19,6; 196	0,79	384	17,44
4	1	0,90	19,5; 195	0,81	380	17,55
	2	0,92	19,3; 193	0,84	372	17,75
	3	0,94	19,1; 191	0,88	365	17,95
5	1	0,95	18,9; 189	0,90	357	17,95
	2	0,97	18,7; 187	0,94	349	18,14
	3	0,99	18,6; 186	0,98	345	18,41

1		2	3	4	5	6
6	1	1,0	18,5;185	1,0	342	18,5
	2	1,01	18,3;183	1,02	335	18,48
	3	1,02	18,2;182	1,04	331	18,56
7	1	1,03	18,0;180	1,06	324	18,54
	2	1,04	18,1;181	1,08	327	18,82
	3	1,05	17,9; 179	1,10	320	18,79
Σ		19,19	404	23,67	7795	368
$\bar{\mu}_x$		0,91	19,2	1,13	371	17,52

Дані з таблиці 3.19 підставимо в систему рівнянь (2.12).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 45,41$; $b_1 = 6,18$.
За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 11,15 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,51 \geq t_{табл.} = 2,1$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за виразом (2.42). При $F_p = 0,47 \leq F_{табл.} = 2,1$ рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.20

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_6 = f(S_E)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2 x^2 + b_1 x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		$[S_E], \%$ за масою x	$[\sigma_b],$ кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	xy	y^2	yx^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	0,75	19,8; 198	0,56	0,42	0,315	14,1	382	11,08
	2	0,77	19,6; 196	0,59	0,45	0,346	15,09	392	11,56
	3	0,79	19,4; 194	0,62	0,49	0,387	15,32	376	15,32
2	1	0,80	19,2;192	0,64	0,51	0,408	15,36	368	12,28
	2	0,82	18,9;189	0,67	0,55	0,451	15,49	357	12,66
	3	0,83	18,8;18,8	0,68	0,57	0,473	15,60	353	12,78

1		2	3	4	5	6	7	8	9
3	1	0,85	18,7; 187	0,72	0,61	0,518	15,89	349	13,46
	2	0,87	18,4;184	0,75	0,65	0,565	16,0	338	13,8
	3	0,89	18,1;181	0,79	0,71	0,632	16,1	327	14,29
4	1	0,90	17,8; 178	0,81	0,72	0,684	16,02	316	14,42
	2	0,92	17,5;175	0,84	0,77	0,701	16,1	306	14,7
	3	0,94	17,2;172	0,88	0,83	0,780	16,17	295	15,13
5	1	0,95	16,9; 169	0,90	0,86	0,817	16,05	285	15,21
	2	0,97	16,7;167	0,94	0,91	0,887	16,39	279	15,69
	3	0,99	16,5;165	0,98	0,97	0,961	17,03	272	16,17
6	1	1,0	16,4; 164	1,0	1,0	1,0	16,4	268	16,4
	2	1,01	16,2;162	1,02	1,03	1,04	16,36	262	16,52
	3	1,02	16,0;160	1,04	1,06	1,08	16,32	256	16,64
7	1	1,03	15,9;159	1,06	1,09	1,12	16,37	253	16,85
	2	1,04	15,7;157	1,08	1,12	1,16	16,33	246	16,95
	3	1,05	15,5;155	1,10	1,15	1,20	16,27	240	17,05
Σ		19,19	369	23,6	103	18,52	334,76	6520	308,96
μ _x		0,91	17,6	1,13	4,88	0,88	15,94	310,47	14,71

Виконаємо підстановку даних з таблиці 3.20 в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=48$; $b_1=-34,7$; $b_2=3,18$.

За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0}=11,2 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p1}=8,08 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p2}=2,2 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера за виразом (2.43). Рівняння регресії адекватне при $F_p=0,28 \leq F_{\text{табл.}}=2,1$.

Таблиця 3.21

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(S_E)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[S _E], % за масою <i>x</i>	[σ _B], кг/мм ² ; МПа <i>y</i>	<i>x</i> ²	<i>x</i> ³	<i>x</i> ⁴	<i>x</i> ⁵	<i>x</i> ⁶	<i>y</i> ²	<i>xy</i>	<i>yx</i> ³
1	1	0,75	18,9; 189	0,56	0,42	0,315	0,236	0,17	357	14,17	7,94
	2	0,77	18,8;188	0,59	0,45	0,346	0,266	0,21	353	14,47	8,46
	3	0,79	18,7;187	0,62	0,49	0,387	0,305	0,24	349	14,77	9,16
2	1	0,80	18,6; 186	0,64	0,51	0,408	0,326	0,26	346	14,88	9,48
	2	0,82	18,6; 186	0,67	0,55	0,451	0,369	0,30	346	15,25	10,2
	3	0,83	18,6; 186	0,68	0,57	0,473	0,392	0,32	346	15,44	10,6
3	1	0,85	18,6; 186	0,72	0,61	0,518	0,440	0,37	346	15,81	11,3
	2	0,87	18,6; 186	0,75	0,65	0,565	0,491	0,43	346	16,18	12,1
	3	0,89	18,5; 185	0,79	0,71	0,632	0,562	0,50	342	16,46	13,1
4	1	0,90	18,5; 185	0,81	0,72	0,684	0,615	0,55	342	16,65	13,3
	2	0,92	18,2;182	0,84	0,77	0,701	0,644	0,59	331	16,74	14,0
	3	0,94	17,7;177	0,88	0,83	0,780	0,733	0,68	313	16,63	14,7
5	1	0,95	17,5; 175	0,90	0,86	0,817	0,776	0,73	306	16,62	15,1
	2	0,97	17,1;171	0,94	0,91	0,887	0,860	0,83	292	16,58	16,1
	3	0,99	16,7;167	0,98	0,97	0,961	0,951	0,94	278	16,53	16,2
6	1	1,0	16,3;163	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	265	16,3	16,3
	2	1,01	16,0;160	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	256	16,32	16,5
	3	1,02	15,7;157	1,04	1,06	1,08	1,10	1,12	246	16,01	16,6
7	1	1,03	15,5;155	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	240	15,96	16,8
	2	1,04	15,3;153	1,08	1,12	1,16	1,16	1,20	234	15,91	17,1
	3	1,05	15; 150	1,10	1,15	1,20	1,26	1,32	225	15,75	17,2
Σ		19,19	333	23,67	103	18,52	14,68	13,9	6459	351	269
μ _{<i>x</i>}		0,91	15,84	1,13	4,88	0,88	0,69	0,66	307	16,7	12,8

Підставимо в систему рівнянь (2.25) дані з таблиці 3.21.

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 72,89$; $b_1 = -0,15$; $b_2 = -0,55$; $b_3 = 0,22$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 18,78 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 2,58 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 26,2 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p3} = 21 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.42)), якщо $F_p = 0,00012 \leq F_{\text{табл.}} = 2,2$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.22

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB = f(C)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	xy
1		2	3	4	5	6
1	1	3,10	20,5; 205	9,61	420	63,55
	2	3,12	20,3; 203	9,73	412	63,33
	3	3,15	20,0; 200	9,9	400	63,0
2	1	3,20	19,8; 198	10,2	392	63,36
	2	3,23	19,6; 196	10,4	384	63,31
	3	3,27	19,4; 194	10,7	376	63,43
3	1	3,30	19,3; 193	10,9	372	63,69
	2	3,33	19,2; 192	11,1	368	63,9
	3	3,36	19,1; 191	11,3	365	64,17
4	1	3,40	19,0; 190	11,5	361	64,6
	2	3,44	18,8; 188	11,8	353	64,67
	3	3,48	18,7; 187	12,1	349	65,1
5	1	3,50	18,6; 186	12,2	345	65,1
	2	3,53	18,5; 185	12,4	342	65,3
	3	3,56	18,4; 184	12,6	338	65,5

1		2	3	4	5	6
6	1	3,60	18,2; 182	12,9	331	65,52
	2	3,62	17,9;179	13,1	320	64,7
	3	3,65	17,8;178	13,3	316	64,9
7	1	3,66	17,7;177	13,4	313	64,7
	2	3,68	17,6;176	13,5	309	64,76
	3	3,70	17,5; 175	13,7	306	64,75
Σ		68,62	395	246	6523	1351
$\bar{\mu}_x$		3,27	18,85	11,72	310,6	63,34

Дані з таблиці 3.22 підставляємо в систему рівнянь (2.12).

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 306$; $b_1 = 38,78$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 239 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 30,29 \geq t_{табл.} = 2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за t -критерієм Фішера (вираз (2.42)). Рівняння регресії адекватне, якщо $F_p = 0,30 \leq F_{табл} = 2,1$.

Таблиця 3.23

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB=f(C)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	xy	y^2	$y x^2$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	3,10	20,7;207	9,61	29,79	92,35	63,55	428	198
	2	3,12	20,5;205	9,73	30,30	94,53	64,17	420	199
	3	3,15	20,3;203	9,9	31,18	98,21	63,94	412	200
2	1	3,20	20,3;203	10,2	32,64	104	64,96	412	207
	2	3,23	20,2;202	10,4	33,59	108	65,24	408	210
	3	3,27	20,1;201	10,7	34,98	114	65,27	404	215

1		2	3	4	5	6	7	8	9
3	1	3,30	20,0;200	10,9	35,97	122	66,0	400	218
	2	3,33	19,9;199	11,1	36,96	123	66,26	396	221
	3	3,36	19,9;199	11,3	37,96	127	66,86	396	225
4	1	3,40	19,5;195	11,5	39,10	132	66,30	380	224
	2	3,44	19,3;193	11,8	40,59	139	66,39	372	227
	3	3,48	19,1;191	12,1	42,11	146	66,46	365	231
5	1	3,50	18,9;189	12,2	42,70	149	66,15	367	231
	2	3,53	18,8;188	12,4	43,77	154	66,36	353	233
	3	3,56	18,7;187	12,6	44,85	159	66,57	349	235
6	1	3,60	17,6;176	12,9	46,44	167	63,36	309	227
	2	3,62	17,4;174	13,1	47,42	171	62,98	302	227
	3	3,65	17,3;173	13,3	48,54	177	63,14	299	230
7	1	3,66	16,5;165	13,4	49,04	179	60,39	272	221
	2	3,68	16,4;164	13,5	49,68	182	60,35	268	221
	3	3,70	16,3;163	13,75	50,69	187	60,31	265	224
Σ		68,62	378	246	835	2776	1355	7181	4624
$\bar{\mu}_x$		3,27	17,98	11,72	39,77	132	64,52	341	2312

Підставляємо в систему рівнянь (2.23) дані з таблиці 3.23.

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 867$; $b_1 = -351,45$; $b_2 = 43,35$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 1111 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 450 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 55,56 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.43) при $F_p = 0,0029 \leq F_{табл.} = 2,1$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.24

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HV = f(C)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C], % за масою x	[HV], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	y^2	xy	yx^3
1	1	3,10	21,5;215	9,61	29,8	92,3	286	886	462	66,65	640
	2	3,12	21,0;210	9,73	30,3	94,5	293	914	441	65,52	636
	3	3,15	20,5;205	9,9	31,2	98,2	309	973	420	64,57	639
2	1	3,20	19,8;198	10,2	32,6	104	332	1062	392	63,36	646
	2	3,23	19,6;196	10,4	33,6	108	349	1127	384	63,31	658
	3	3,27	19,4;194	10,7	34,9	114	372	1216	376	63,44	678
3	1	3,30	19,2;192	10,9	35,9	122	402	1326	368	63,36	690
	2	3,33	19,0;190	11,1	36,9	123	409	1362	361	63,27	701
	3	3,36	18,8;188	11,3	37,9	127	426	1431	353	63,17	712
4	1	3,40	18,6;186	11,5	39,1	132	448	1523	346	63,24	772
	2	3,44	18,6;186	11,8	40,6	139	478	1644	346	63,98	754
	3	3,48	18,6;186	12,1	42,1	146	508	1767	346	64,73	783
5	1	3,50	18,7;187	12,2	42,7	149	521	1823	349	65,45	798
	2	3,53	18,7;187	12,4	43,7	154	543	1916	349	66,01	818
	3	3,56	18,6;186	12,6	44,8	159	566	2015	346	66,21	834
6	1	3,60	18,3;183	12,9	46,4	167	615	2214	335	65,88	849
	2	3,62	18,0;180	13,1	47,4	171	619	2240	324	65,16	853
	3	3,65	17,5;175	13,3	48,5	177	646	2357	306	63,87	849
7	1	3,66	17,0;170	13,4	49,1	179	655	2397	289	62,22	833
	2	3,68	16,8;168	13,5	49,7	182	669	2461	282	61,82	834
	3	3,70	16,5;165	13,7	50,7	187	691	2556	272	61,05	836
Σ		68,62	395	246	835	2776	9212	33107	7447	1347	15813
$\bar{\mu}_x$		3,27	18,79	11,7	39,7	132	438	1576	355	64,15	753

Дані з таблиці 3.24 підставимо в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 550$; $b_1 = 47,25$; $b_2 = -52,24$; $b_3 = 9,36$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 429 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 36,91 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 40,81 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p3} = 7,31 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за виразом (2.43). Якщо $F_p = 0,00044 \leq F_{табл} = 2,2$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.25

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB = f(Si)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/П		[Si], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	xy
1	2	3	4	5	6	
1	1	1,90	17,5;175	3,6	306	33,25
	2	1,93	17,4;174	3,7	303	33,58
	3	1,97	17,3;173	3,8	299	34,08
2	1	2,0	17,2;172	4,0	295	34,40
	2	2,05	17,1;171	4,2	292	35,05
	3	2,08	17,0;170	4,3	289	35,36
3	1	2,1	16,9;169	4,4	285	35,49
	2	2,14	16,8;168	4,6	282	35,95
	3	2,17	16,7;167	4,7	279	36,24
4	1	2,2	16,6;166	4,8	275	36,3
	2	2,22	16,5;165	4,9	272	36,63
	3	2,28	16,3;163	5,2	265	37,16
5	1	2,3	16,2;162	5,3	262	37,26
	2	2,32	16,1;161	5,4	261	37,35
	3	2,37	16,0;160	5,6	256	37,92

1		2	3	4	5	6
6	1	2,40	15,9;159	5,7	252	38,16
	2	2,42	15,7;157	5,8	246	37,99
	3	2,44	15,7;157	5,9	246	38,30
7	1	2,45	15,5; 155	6,00	240	37,97
	2	2,47	15,4; 154	6,10	237	38,04
	3	2,50	15,2; 152	6,25	231	38,00
Σ		54,15	344	122	5673	799
$\bar{\mu}_x$		2,57	16,38	5,82	270	38,05

Проведемо підстановку даних з таблиці 3.25 в систему рівнянь (2.12).

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 196$; $b_1 = 15,42$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 138 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 10,85 \geq t_{табл.} = 2,08$ коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера за виразом (2.42). Рівняння регресії адекватне при $F_p = 0,15 \leq F_{табл} = 2,1$.

Таблиця 3.26

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HV = f(Si)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Si], % за масою x	[HV], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	xy	yx^2
1		2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	1,90	16,6;166	3,6	6,84	13,03	275	31,54	59,76
	2	1,93	16,5;165	3,7	7,14	13,87	272	31,84	61,05
	3	1,97	16,4;164	3,8	5,85	15,13	268	32,31	62,32

1		2	3	4	5	6	7	8	9
2	1	2,0	16,3;163	4,0	8,0	16,0	265	32,6	65,2
	2	2,05	16,2;162	4,2	8,61	17,65	262	33,21	68,04
	3	2,08	16,1;161	4,3	8,99	18,69	259	33,48	69,23
3	1	2,1	16;160	4,4	9,26	19,44	256	33,6	70,4
	2	2,14	15,6;156	4,6	9,8	20,97	243	33,38	71,76
	3	2,17	15,4;154	4,7	10,21	22,15	237	33,41	72,38
4	1	2,2	15,3;153	4,8	10,65	23,43	234	33,66	73,44
	2	2,22	15,2;152	4,9	10,94	24,06	231	33,74	74,48
	3	2,28	15,1;151	5,2	11,85	27,02	228	34,42	78,52
5	1	2,3	15;150	5,3	12,16	27,96	225	34,5	79,5
	2	2,32	15;150	5,4	12,48	28,95	225	34,8	81
	3	2,37	15;150	5,6	15,33	36,33	225	35,55	84
6	1	2,40	15;150	5,7	13,82	33,16	225	36,00	85,5
	2	2,42	15;150	5,8	14,17	34,29	225	36,3	87
	3	2,44	15;150	5,9	14,52	35,43	225	36,6	88,5
7	1	2,45	15;150	6,00	14,70	36,01	225	36,75	90
	2	2,47	14,9;149	6,10	15,06	37,19	222	36,80	89,4
	3	2,50	14,9;149	6,25	15,62	39,05	222	37,25	93,1
Σ		54,15	310	122	236	540	5049	722	1604
$\bar{\mu}_x$		2,57	14,77	5,82	11,24	25,70	240	34,36	76,41

Підставимо в систему рівнянь (2.23) дані з таблиці 3.26.

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 180$; $b_1 = -0,35$; $b_2 = -3,59$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 140 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 3,65 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 2,81 \geq t_{табл.} = 2,08$ коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.43)), якщо $F_p = 1,57 \leq F_{кр} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.27

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB = f(Si)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Si], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	xy	y^2	yx^3
1	1	1,90	17,3;173	3,6	6,84	13,03	24,75	47,0	32,87	299	118
	2	1,93	17,4;174	3,7	7,14	13,87	27,76	53,57	33,58	303	124
	3	1,97	17,5;175	3,8	7,64	15,13	29,81	58,72	34,47	306	133
2	1	2,0	17,7;177	4,0	8,0	16,0	32,0	64,0	35,4	313	141
	2	2,05	17,7;177	4,2	8,61	17,65	36,18	74,17	36,28	313	152
	3	2,08	17,7;177	4,3	8,99	18,69	38,87	80,84	36,81	313	159
3	1	2,10	17,5;175	4,4	9,26	19,44	40,82	85,72	36,75	306	162
	2	2,14	17,3;173	4,6	9,8	20,97	44,87	96,0	37,02	299	169
	3	2,17	17,1;171	4,7	10,21	22,15	48,06	104	37,10	292	175
4	1	2,20	16,7;167	4,8	10,65	23,43	51,54	113	36,74	278	177
	2	2,22	16,5;165	4,9	10,94	24,06	53,41	118	36,63	272	180
	3	2,28	16,2;162	5,2	11,85	27,02	61,60	140	36,93	262	192
5	1	2,30	16,1;161	5,3	12,16	27,96	64,31	148	37,03	259	195
	2	2,32	15,7;157	5,4	12,48	28,95	67,16	156	36,42	246	196
	3	2,37	15,6;156	5,6	15,33	36,33	86,10	204	36,97	243	239
6	1	2,40	15,5;155	5,7	13,82	33,16	79,58	190	37,2	240	214
	2	2,42	15,4;154	5,8	14,17	34,29	82,98	200	37,26	237	218
	3	2,44	15,4;154	5,9	14,52	35,43	86,44	210	37,57	237	223
7	1	2,45	15,3;153	6,00	14,70	36,01	88,22	216	37,48	234	225
	2	2,47	15,3;153	6,10	15,06	37,19	91,85	226	37,79	234	229
	3	2,50	15,2;152	6,25	15,62	39,05	97,62	244	38,0	231	237
Σ		54,15	346	122	236	540	1233	5253	766	5480	3858
μ _x		2,57	16,48	5,82	11,24	25,70	58,75	250	36,49	261	184

Дані з таблиці 3.27 підставляємо в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=55,25$; $b_1=183,73$; $b_2=-93,81$; $b_3=14,28$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=38,62 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=128 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2}=65,6 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p3}=9,9 \geq t_{табл.}=2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховане за t -критерієм Фішера (вираз (2.42)). При $F_p=0,00044 \leq F_{табл.}=2,2$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.28

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB = f(C+Si)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/П		[C+Si], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	xy
1		2	3	4	6	7
1	1	5,10	18,4;184	26,1	338	93,84
	2	5,17	18,1;181	26,7	327	93,57
	3	5,24	17,6;176	27,4	309	92,22
2	1	5,30	17,4;174	28,1	303	92,22
	2	5,39	17,2;172	29,0	295	92,71
	3	5,46	16,9;169	29,8	285	92,27
3	1	5,50	16,7;167	30,2	279	91,85
	2	5,58	16,6;166	31,1	275	92,63
	3	5,65	16,5;165	31,9	272	93,22
4	1	5,70	16,4;164	32,5	268	93,48
	2	5,76	16,2;162	33,1	262	93,31
	3	5,84	16,1;161	34,1	259	94,02
5	1	5,90	16,0;160	34,8	256	94,4
	2	5,95	15,9;159	35,4	253	94,6
	3	6,0	15,8;158	36	249	94,8
6	1	6,10	15,8;158	38,3	249	96,4
	2	6,15	15,7;157	38,5	246	96,5
	3	6,18	15,6;156	38,6	243	96,4

1		2	3	4	5	6
7	1	6,23	15,5;155	38,8	240	96,56
	2	6,27	15,4;154	39,3	237	96,55
	3	6,30	15,3;153	39,7	234	96,39
Σ		120,7	345	969	5679	1894,9
$\bar{\mu}_x$		5,75	16,43	46,14	270,4	90,23

Підставляємо в систему рівнянь (2.12) дані з таблиці 3.28.

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 279,96$; $b_1 = -20,29$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 44,3 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 4 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.42), якщо $F_p = 1,2 \leq F_{табл} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.29

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HV = f(C+Si)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/П		[C+Si], % за масою x	[HV], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	xy	yx^2
1		2	3	4	5	6	7	8	9
1	1	5,10	19;190	26,1	133	678	361	96,9	459
	2	5,17	18,7;187	26,7	138	713	349	96,67	499
	3	5,24	18,3;183	27,4	143	749	335	95,89	501
2	1	5,30	17,0;170	28,1	149	789	289	90,1	476
	2	5,39	16,7;167	29,0	156	840	279	90,0	484
	3	5,46	16,4;164	29,8	163	889	269	91,2	488
3	1	5,50	16,0;160	30,2	166	913	256	88,0	483
	2	5,58	15,9;159	31,1	173	965	253	88,72	494
	3	5,65	15,8;158	31,9	175	988	249	89,27	504

1		2	3	4	5	6	7	8	9
4	1	5,70	15,8;158	32,5	185	1054	249	90,06	513
	2	5,76	15,7;157	33,1	190	1094	246	90,43	519
	3	5.84	15,6;156	34,1	199	1162	246	91,1	530
5	1	5,90	15,6;156	34,8	205	1209	246	92,0	543
	2	5,95	15,6;156	35,4	210	1249	246	92,8	552
	3	6,0	15,5;155	36,0	216	1296	240	93,0	558
6	1	6,10	15,5;155	37,2	227	1384	240	94,5	576
	2	6,15	15,4;154	37,8	232	1426	237	94,7	582
	3	6,18	15,4;154	38,2	236	1458	237	95,2	573
7	1	6,23	15,3;153	38,8	242	1507	234	95,3	593
	2	6,27	15,2;152	39,3	246	1542	231	95,3	597
	3	6,30	15,1;151	39,7	250	1575	228	95,1	599
Σ		120,7	329	969	4034	23480	5520	1946	11123
μ _x		5,75	15,69	46,14	192	1118	263	92,67	529

Дані з таблиці 3.29 підставимо в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=354$; $b_1=-46,35$; $b_2 = 2,28$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 115 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 25,86 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 2,98 \geq t_{табл.} = 2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за виразом (2.43). Якщо $F_p = 0,21 \leq F_{табл} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.30

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HV = f(C+Si)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C+Si], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	y^2	xy	yx^3
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	5,10	19,6;196	26,1	133	678	3457	17630	384	99,96	2606
	2	5,17	19,4;194	26,7	138	713	3686	19056	376	100	2677
	3	5,24	19,2;192	27,4	143	749	3924	20561	368	101	2745

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	1	5,30	18,8;188	28,1	149	789	4181	22189	353	99,64	2801
	2	5,39	18,3;183	29,0	156	840	4527	24400	335	98,63	2854
	3	5,46	17,5;175	29,8	163	889	4853	26497	306	95,55	2852
3	1	5,50	16,7;167	30,2	166	913	5021	27615	279	91,85	2772
	2	5,58	16,4;164	31,1	173	965	5384	30042	268	91,51	2837
	3	5,65	15,6;156	31,9	175	988	5582	31538	243	88,14	2730
4	1	5,70	15,4; 154	32,5	185	1054	6007	34239	237	87,78	2849
	2	5,76	15,4;154	33,1	190	1094	6301	36293	237	87,12	2969
	3	5,84	15,3;153	34,1	199	1162	6786	39630	234	88,84	3045
5	1	5,90	15,3;153	34,8	205	1209	7149	42179	234	90,27	3136
	2	5,95	15,3;153	35,4	210	1249	7431	44214	234	91,03	3213
	3	6,0	15,3;153	36,0	216	1296	7776	46656	234	91,8	3304
6	1	6,10	15,3;153	37,2	227	1384	8442	51496	234	93,33	3473
	2	6,15	15,2;152	37,8	232	1426	8769	53929	231	93,48	3562
	3	6,18	15,2;152	38,2	236	1458	9010	55681	231	93,93	3587
7	1	6,23	15,2;152	38,8	242	1507	9388	58487	231	94,69	3678
	2	6,27	15,1;151	39,3	246	1542	9668	60618	228	94,67	3714
	3	6,30	15,1;151	39,7	250	1575	9922	62508	228	95,13	3775
Σ		120,7	375	969	4034	23480	137264	805458	5246	1968	3,2·10 ⁷
μ _x		5,75	17,86	46,1	192	1118	6536	38355	250	93,73	1,5·10 ⁶

Підставимо в систему рівнянь (2.25) дані з таблиці 3.30.

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=453$; $b_1=-97,3$; $b_2=10,98$; $b_3=0,49$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=99,6 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=24,1 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2}=2,87 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p3}=2,5 \geq t_{табл.}=2,08$ – коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера за виразом (2.42). При $F_p=0,67 \leq F_{табл.}=2,2$ рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.31

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB = f(Mn)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Mn], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	xy
1	1	0,45	17,4;174	0,20	302	7,83
	2	0,47	17,4;174	0,22	302	8,17
	3	0,49	17,5;175	0,24	306	8,57
2	1	0,50	17,6;176	0,25	309	8,80
	2	0,52	17,6;176	0,27	309	9,15
	3	0,54	17,7;177	0,29	313	9,55
3	1	0,55	17,7;177	0,30	313	9,73
	2	0,57	17,8;178	0,30	316	10,1
	3	0,59	17,9;179	0,35	320	10,56
4	1	0,60	18,1;181	0,36	327	10,86
	2	0,62	18,3;183	0,38	335	11,34
	3	0,64	18,5;185	0,41	342	11,84
5	1	0,65	18,6;186	0,42	345	12,09
	2	0,67	18,7;187	0,44	349	12,52
	3	0,68	18,7;187	0,46	340	12,71
6	1	0,70	18,8;188	0,49	353	13,16
	2	0,71	18,8;188	0,50	353	13,34
	3	0,72	18,9;189	0,51	357	13,61
7	1	0,73	18,9;189	0,53	357	13,79
	2	0,74	19,0;190	0,54	361	14,06
	3	0,75	19,1;191	0,56	364	14,32
Σ		12,89	402	8,02	7561	236
$\bar{\mu}_x$		0,61	19,13	0,38	360	11,24

Виконаємо підстановку даних з таблиці 3.31 в систему рівнянь (2.12).

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 165,78$; $b_1 = 14,10$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 23,75 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,1 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.42)), якщо $F_p = 0,59 \leq F_{табл.} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.32

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HВ = f(Mn)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[Mn], % за масою x	[HВ], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	xy	yx^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	0,45	16,5;165	0,20	0,09	0,04	272	7,42	3,3
	2	0,47	16,7;167	0,22	0,10	0,05	278	7,84	3,6
	3	0,49	16,8;168	0,24	0,11	0,05	282	8,23	4,0
2	1	0,50	17,0;170	0,25	0,12	0,06	289	8,50	4,2
	2	0,52	17,1;171	0,27	0,14	0,07	292	8,89	4,6
	3	0,54	17,2;172	0,29	0,15	0,08	295	9,28	4,9
3	1	0,55	17,3;173	0,30	0,16	0,08	299	9,51	5,2
	2	0,57	17,3;173	0,30	0,17	0,09	200	9,86	5,2
	3	0,59	17,4;174	0,35	0,20	0,12	302	10,2	6,1
4	1	0,60	17,5;175	0,36	0,21	0,13	306	10,5	6,3
	2	0,62	17,6;176	0,38	0,23	0,14	309	10,9	6,6
	3	0,64	17,7;177	0,41	0,26	0,16	313	11,3	7,2
5	1	0,65	17,8;178	0,42	0,27	0,17	316	11,5	7,4
	2	0,67	17,9;179	0,44	0,29	0,19	320	11,9	7,8
	3	0,68	17,9;179	0,46	0,31	0,21	320	12,2	8,2

1		2	3	4	5	6	7	8	9
6	1	0,70	18;180	0,49	0,34	0,24	324	12,6	8,8
	2	0,71	18;180	0,50	0,35	0,25	324	12,7	9,0
	3	0,72	18,1;181	0,51	0,36	0,26	327	13,0	9,2
7	1	0,73	18,1;181	0,53	0,38	0,27	327	13,2	9,5
	2	0,74	18,2;182	0,54	0,39	0,28	331	13,4	9,8
	3	0,75	18,3;183	0,56	0,42	0,31	334	13,7	10,2
Σ		12,89	368,4	8,02	5,05	3,25	6360	226	141
$\bar{\mu}_x$		0,61	17,58	0,38	0,24	0,15	303	10,8	6,71

Підставимо в систему рівнянь (2.23) дані з таблиці 3.32.

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 165,75$; $b_1 = -15,98$; $b_2 = 15,88$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 25,9 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,4 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p2} = 2,79 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за t -критерієм Фішера (вираз (2.43)). Рівняння регресії адекватне при $F_p = 0,23 \leq F_{табл} = 2,1$.

Таблиця 3.33

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB = f(Mn)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п	[Mn], % за масою x		[HB], кг/мм ² ; МПа y		x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	xy	y^2	yx^3
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0,45	16;160	0,20	0,09	0,04	0,018	0,008	7,2	256	1,44	1,44
	2	0,47	16,1;161	0,22	0,10	0,05	0,023	0,011	7,5	259	1,61	1,61
	3	0,49	16,2;162	0,24	0,11	0,05	0,024	0,012	7,9	262	1,62	1,62
2	1	0,50	16,3;163	0,25	0,12	0,06	0,030	0,015	8,1	265	1,95	1,95
	2	0,52	16,5;165	0,27	0,14	0,07	0,036	0,019	8,6	275	2,31	2,31
	3	0,54	16,6;166	0,29	0,15	0,08	0,043	0,023	8,9	275	2,49	2,49

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	1	0,55	16,7;167	0,30	0,16	0,08	0,044	0,024	9,1	278	2,67
	2	0,57	16,8;168	0,30	0,17	0,09	0,051	0,029	9,6	282	2,85
	3	0,59	16,9;169	0,35	0,20	0,12	0,071	0,041	9,9	285	3,38
4	1	0,60	17;170	0,36	0,21	0,13	0,078	0,047	10,2	289	3,91
	2	0,62	17,5;175	0,38	0,23	0,14	0,086	0,053	10,8	306	4,0
	3	0,64	17,7;177	0,41	0,26	0,16	0,102	0,065	11,3	313	4,6
5	1	0,65	17,8;178	0,42	0,27	0,17	0,111	0,072	11,5	316	4,8
	2	0,67	17,9;179	0,44	0,29	0,19	0,121	0,081	11,9	320	5,1
	3	0,68	18;180	0,46	0,31	0,21	0,143	0,097	12,2	324	5,58
6	1	0,70	17,7;177	0,49	0,34	0,24	0,168	0,134	12,3	313	6,0
	2	0,71	17,6;176	0,50	0,35	0,25	0,177	0,125	12,5	309	6,1
	3	0,72	17,6;176	0,51	0,36	0,26	0,187	0,134	12,6	309	6,3
7	1	0,73	17,5;175	0,53	0,42	0,30	0,219	0,159	12,7	306	7,3
	2	0,74	17,4;175	0,54	0,39	0,29	0,214	0,158	12,8	302	6,7
	3	0,75	17,3;173	0,56	0,42	0,31	0,232	0,174	12,8	299	7,2
Σ		12,89	341	8,02	5,09	329	220	1,481	207	6143	2116
μ _x		0,61	16,26	0,38	0,24	0,16	10,5	0,070	9,88	292	101

Дані з таблиці 3.33 підставляємо в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 149,65$; $b_1 = 37,14$; $b_2 = -37,85$; $b_3 = 15,53$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 25,36 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 6,29 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 6,41 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p3} = 2,63 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.42), якщо $F_p = 0,00014 \leq F_{\text{табл.}} = 2,2$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.34

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB = f(S)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[S], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	xy
1	1	0,02	14,0;140	0,0004	196	0,28
	2	0,025	14,2;142	0,0006	201	0,35
	3	0,03	14,5;145	0,0009	210	0,43
2	1	0,04	14,6;146	0,0016	213	0,58
	2	0,045	14,7;147	0,0020	216	0,66
	3	0,050	14,9;149	0,0025	222	0,74
3	1	0,06	15,0;150	0,0036	225	0,90
	2	0,065	15,2;152	0,0042	231	0,98
	3	0,07	15,4;154	0,0049	237	1,07
4	1	0,08	15,5;155	0,0064	240	1,24
	2	0,085	15,6;156	0,0072	243	1,32
	3	0,09	15,7;157	0,0081	246	1,41
5	1	0,10	15,8;158	0,010	249	1,58
	2	0,105	15,9;159	0,011	253	1,66
	3	0,11	15,9;159	0,012	253	1,75
6	1	0,12	16,0;160	0,014	256	1,92
	2	0,125	16,0;160	0,015	256	2,0
	3	0,13	16,1;161	0,016	259	2,09
7	1	0,132	16,2;162	0,017	262	2,14
	2	0,136	16,2;162	0,018	262	2,20
	3	0,14	16,3;163	0,019	265	2,28
Σ		1,76	324	0,313	4995	27,58
μ		0,08	15,41	0,045	238	1,31

Підставляємо в систему рівнянь (2.12) дані з таблиці 3.34.

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=140,35$; $b_1=195,35$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=3,41 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=4,75 \geq t_{табл.}=2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за виразом (2.42). При $F_p=0,36 \leq F_{табл.}=2,1$ рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.35

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB = f(S)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[S], % за масою x	[HB], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	y^2	xy	yx^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	0,02	15;150	0,0004	0,000008	0,00000016	225	0,30	0,006
	2	0,025	15,1;151	0,0006	0,000015	0,00000037	228	0,37	0,009
	3	0,03	15,2;152	0,0009	0,000027	0,00000081	231	0,45	0,014
2	1	0,04	15,3;153	0,0016	0,000064	0,00000025	234	0,61	0,024
	2	0,045	15,4;154	0,0020	0,000091	0,00000041	237	0,69	0,031
	3	0,050	15,5;155	0,0025	0,000125	0,00000062	240	0,77	0,038
3	1	0,06	15,6;156	0,0036	0,000216	0,0000129	243	0,94	0,056
	2	0,065	15,8;158	0,0042	0,000270	0,0000175	249	1,02	0,066
	3	0,07	16,0;160	0,0049	0,000343	0,000024	256	1,12	0,078
4	1	0,08	16,2;162	0,0064	0,000512	0,000041	262	1,29	0,103
	2	0,085	16,4;164	0,0072	0,000614	0,000052	268	1,39	0,118
	3	0,09	16,6;166	0,0081	0,000729	0,000065	275	1,49	0,140
5	1	0,10	16,7;167	0,010	0,00100	0,0001	279	1,67	0,167
	2	0,105	16,8;168	0,011	0,00115	0,00012	282	1,76	0,184
	3	0,11	16,9;169	0,012	0,00133	0,00014	285	1,85	0,202
6	1	0,12	16,9;169	0,014	0,00172	0,00020	285	2,03	0,236
	2	0,125	17;170	0,015	0,00195	0,00024	289	2,12	0,255
	3	0,13	17,1;171	0,016	0,00219	0,00028	292	2,22	0,273

1		2	3	4	5	6	7	8	9
7	1	0,132	17,2;172	0,017	0,00229	0,00030	295	2,27	0,292
	2	0,136	17,3;173	0,018	0,00251	0,00034	299	2,35	0,311
	3	0,14	17,4;174	0,019	0,00274	0,00038	302	2,43	0,330
Σ		1,76	477	0,313	0,0347	0,000424	5556	29,1	2,93
$\bar{\mu}_x$		0,08	22,73	0,045	0,00016	0,000020	264	1,38	0,14

Дані з таблиці 3.35 підставимо в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=178,8$; $b_1=-427$; $b_2=2489$. За t -критерієм Ст'юдента рівняння (2.41) якщо $t_{po}=2,95 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=7,06 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2}=41,18 \geq t_{табл.}=2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за t -критерієм Фішера за виразом (2.43). Якщо $F_p=0,00045 \leq F_{табл.}=2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.36

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HB=f(S)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[S], % за масою x	[HB] кг/мм ² y	x ²	x ³	x ⁴	x ⁵	x ⁶	xy	y ²	yx ³
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	0,02	20,5	4·10 ⁻⁴	8·10 ⁻⁶	1,6·10 ⁻⁷	3·10 ⁻⁹	6·10 ⁻¹¹	0,4	420	2·10 ⁻⁴
	2	0,02	21,1	6·10 ⁻⁴	1,5·10 ⁻⁵	3,7·10 ⁻⁷	7·10 ⁻⁹	1,4·10 ⁻¹⁰	0,4	445	3·10 ⁻⁴
	3	0,03	21,2	9·10 ⁻⁴	2,7·10 ⁻⁵	8,1·10 ⁻⁷	2·10 ⁻⁸	6·10 ⁻¹⁰	0,6	449	5·10 ⁻⁴
2	1	0,04	21,3	1·10 ⁻³	6,4·10 ⁻⁵	2,5·10 ⁻⁷	1·10 ⁻⁸	4·10 ⁻¹⁰	0,8	453	9·10 ⁻⁴
	2	0,04	21,4	2·10 ⁻³	9,1·10 ⁻⁵	4,1·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁷	4·10 ⁻⁹	0,8	457	2·10 ⁻³
	3	0,05	21,5	2·10 ⁻³	12,5·10 ⁻⁵	6,2·10 ⁻⁶	3·10 ⁻⁷	1,5·10 ⁻⁸	1,1	462	2·10 ⁻⁴
3	1	0,06	21,5	3·10 ⁻³	21,6·10 ⁻⁵	1,29·10 ⁻⁵	7·10 ⁻⁷	4·10 ⁻⁸	1,3	462	5·10 ⁻⁴
	2	0,06	21,8	4·10 ⁻³	27,0·10 ⁻⁵	1,75·10 ⁻⁵	2·10 ⁻⁶	1·10 ⁻⁷	1,3	475	4·10 ⁻³
	3	0,07	21,9	4·10 ⁻³	34,3·10 ⁻⁵	2,4·10 ⁻⁵	1·10 ⁻⁶	7·10 ⁻⁷	1,5	479	7·10 ⁻⁴

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
4	1	0,08	22,0	$6 \cdot 10^{-3}$	$51,2 \cdot 10^{-5}$	$4,1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	1,2	484	$1 \cdot 10^{-3}$
	2	0,08	22,1	$7 \cdot 10^{-3}$	$61,4 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	1,2	488	$1 \cdot 10^{-3}$
	3	0,09	22,2	$8 \cdot 10^{-3}$	$72,9 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-7}$	1,5	492	0,001
5	1	0,10	22,3	0,010	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	2,2	497	0,022
	2	0,10	22,3	0,011	$1,15 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	2,2	497	0,033
	3	0,11	22,4	0,012	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-6}$	2,4	501	0,029
6	1	0,12	22,4	0,014	$1,72 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-6}$	2,5	502	0,038
	2	0,12	22,4	0,015	$1,95 \cdot 10^{-3}$	$2,4 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-6}$	2,6	502	0,042
	3	0,13	22,4	0,016	$2,19 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	2,9	502	0,047
7	1	0,13	22,5	0,017	$2,29 \cdot 10^{-3}$	$3,0 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	2,9	506	0,051
	2	0,13	22,5	0,018	$2,51 \cdot 10^{-3}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-5}$	$5 \cdot 10^{-6}$	2,9	506	0,056
	3	0,14	22,5	0,019	$2,74 \cdot 10^{-3}$	$3,8 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-6}$	3,1	506	0,061
Σ		1,76	439	0,313	$34,7 \cdot 10^{-3}$	$4,24 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-5}$	36	9588	0,369
$\bar{\mu}_x$		0,08	20,8	0,045	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	1,7	456	0,017

Проведемо підстановку даних з таблиці 3.36 в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=290$; $b_1=-3277$; $b_2=33488$; $b_3=-63801$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0}=5,21 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p1}=58,89 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p2}=602 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p3}=1146 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$, коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.42)) рівняння регресії адекватне, якщо $F_p=0,00000017 \leq F_{\text{табл.}}=2,2$.

Таблиця 3.37

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HV = f(C_E)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/П		$[C_E]$, % за масою x	$[HV]$, кг/мм ² ; МПа y	x^2	y^2	xy
1		2	3	4	5	6
1	1	3,6	21;210	12,9	441	75,6
	2	3,65	20,8;208	13,3	432	75,9
	3	3,68	20,4;204	13,5	416	75,1

1		2	3	4	5	6
2	1	3,7	19,9;199	13,6	396	73,6
	2	3,73	19,7;197	13,9	388	73,4
	3	3,76	19,3;193	14,1	372	72,5
3	1	3,8	19;190	14,4	361	72,2
	2	3,84	18,9;189	14,7	357	72,6
	3	3,87	18,8;188	14,9	353	72,7
4	1	3,9	18,7;187	15,2	349	72,9
	2	3,95	18,5;185	15,6	342	73
	3	3,97	18,1;181	15,7	327	71,8
5	1	4,0	17,8;176	16,0	316	71,2
	2	4,05	17,4;173	16,4	302	70,4
	3	4,08	17,1;171	16,6	292	69,7
6	1	4,1	16,9;169	16,8	285	69,3
	2	4,12	16,7;167	16,9	279	68,8
	3	4,15	16,5;165	17,2	272	68,5
7	1	4,17	16,3;163	17,4	265	67,9
	2	4,19	16,1;161	17,5	259	67,5
	3	4,22	15,9;159	17,8	253	67,1
Σ		100	407	324	7057	1432
$\bar{\mu}_x$		4,77	19,4	15,44	336	68,21

Підставимо в систему рівнянь (2.12) дані з таблиці 3.37.

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=363,18$; $b_1 = -45,31$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} = 3,81 \geq t_{табл.} = 2,08$; $t_{p1} = 2,11 \geq t_{табл.} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера (вираз (2.42)). Якщо $F_p = 0,15 \leq F_{табл} = 2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.38

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HВ = f(C_E)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ п/п		[C _E], % за масою x	[HВ], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	xy	y^2	yx^2
1	1	3,6	20,2;202	12,9	46,6	167,7	72,7	408	260
	2	3,65	20,1;201	13,3	48,6	177,4	73,3	404	267
	3	3,68	20;200	13,5	49,8	183,2	73,6	408	270
2	1	3,7	19,9;199	13,6	50,6	187,2	73,63	396	270
	2	3,73	19,7;197	13,9	51,8	193,2	73,487	388	273
	3	3,76	19,6;196	14,1	53,1	199,6	3,69	384	276
3	1	3,8	19,5;195	14,4	54,8	215,1	74,1	380	280
	2	3,84	19,3;193	14,7	56,6	217,3	74,11	372	283
	3	3,87	19,1;191	14,9	57,9	224,1	73,91	364	284
4	1	3,9	19;190	15,2	59,3	231,2	74,1	361	288
	2	3,95	18,8;188	15,6	61,6	243,3	74,26	353	293
	3	3,97	18,6;186	15,7	62,6	248,5	73,84	346	292
5	1	4,0	18,3;183	16,0	64,0	256	73,2	335	292
	2	4,05	17,7;177	16,4	66,4	268,9	71,68	313	290
	3	4,08	17,3;173	16,6	67,9	277	70,58	299	287
6	1	4,1	16,5;165	16,8	68,9	282,4	67,65	272	277
	2	4,12	16,1;161	16,9	69,6	286,7	65,92	259	272
	3	4,15	15,7;157	17,2	71,4	296,3	65,15	246	270
7	1	4,17	15,4;154	17,4	72,5	302,33	64,21	237	267
	2	4,19	15,2;152	17,5	73,5	07,9	63,68	231	266
	3	4,22	15,0;150	17,8	75,1	316,9	63,3	225	267
Σ		100	381	324	1282	5082	1490	6981	5824
$\bar{\mu}_x$		3,9	18,14	15,44	61	242	70,95	332	277

Підставимо дані з таблиці 3.38 в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=983,37$; $b_1=-337,89$; $b_2 =33,89$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po} =1156 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1} =397 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2} =38.87 \geq t_{табл.}=2,08$ коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.43) при $F_p.=0,001 \leq F_{табл} = 2,1$ рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.39

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності НВ = $f(C_E)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[C _E], % за масою x	[НВ], кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	xy	y^2	yx^3
1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	3,6	22,0;220	12,9	46,6	167	604	2174	79,2	484	1025
	2	3,65	21,7;217	13,3	48,6	177	643	2347	79,2	471	1054
	3	3,68	21,4;214	13,5	49,8	183	674	2480	78,7	457	1066
2	1	3,7	20,8;208	13,6	50,6	187	692	2560	76,9	432	1052
	2	3,73	20,6;206	13,9	51,8	193	720	2685	76,8	424	1067
	3	3,76	20,3;203	14,1	53,1	199	750	2820	76,3	412	1077
3	1	3,8	20,1;202	14,4	54,8	215	817	3104	76,4	404	1101
	2	3,84	19,9;199	14,7	56,6	217	833	3198	76,4	396	1126
	3	3,87	19,8;198	14,9	57,9	224	866	3351	76,6	392	1146
4	1	3,9	19,6;196	15,2	59,3	231	900	3510	76,4	384	1162
	2	3,95	19,7;197	15,6	61,6	243	959	3788	77,8	388	1213
	3	3,97	19,8;198	15,7	62,6	248	984	3906	78,6	392	1239
5	1	4,0	19,8;198	16,0	64,0	256	1024	4096	79,2	392	1267
	2	4,05	19,7;197	16,4	66,4	268	1085	4394	79,7	388	1308
	3	4,08	19,6;196	16,6	67,9	277	1130	4610	79,9	384	1330
6	1	4,1	19,5;195	16,8	68,9	282	1156	4739	79,9	380	1343
	2	4,12	19,3;193	16,9	69,6	286	1178	4853	79,5	372	1343
	3	4,15	19;190	17,2	71,4	296	1228	5096	78,8	361	1356

1		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7	1	4,17	18,9;189	17,4	72,5	302	1259	5250	78,8	357	1370
	2	4,19	18,7;187	17,5	73,5	307	1286	5388	78,3	349	1374
	3	4,22	18,5;185	17,8	75,1	316	1333	5625	78,7	342	1389
Σ		100	418	324	1282	5082	20122	79974	1407	8179	25408
$\bar{\mu}_x$		3,9	19,9	15,4	61	242	985	3808	67	389	1209

Підставляємо дані з таблиці 3.39 в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=550$; $b_1=-67,78$; $b_2=-17,89$; $b_3= 3,32$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=591 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=72,8 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2}=19,2 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p3}=3,56 \geq t_{табл.}=2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за виразом (2.42). Якщо $F_p=0,015 \leq F_{табл}=2,2$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.40

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HV = f(S_E)$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		$[S_E], \%$ за масою x	$[HV], \text{кг/мм}^2$; МПа y	x^2	y^2	xy
1	2	3	4	5	6	
1	1	0,75	20,2;202	0,56	408	15,15
	2	0,77	20,1;201	0,59	404	15,47
	3	0,79	20;200	0,62	400	15,8
2	1	0,80	20,0;200	0,64	400	16,0
	2	0,82	19,9;199	0,67	396	16,32
	3	0,83	19,8;198	0,68	392	16,43
3	1	0,85	19,7;197	0,72	388	16,74
	2	0,87	19,6;196	0,75	384	17,0
	3	0,89	19,5;195	0,79	380	17,35

1		2	3	4	5	6
4	1	0,90	19,4; 194	0,81	376	17,46
	2	0,92	19,3;193	0,84	372	17,75
	3	0,94	19,2;192	0,88	368	18,05
5	1	0,95	18,9;189	0,90	357	17,95
	2	0,97	18,7;187	0,94	349	18,14
	3	0,99	18,6;186	0,98	345	18,41
6	1	1,0	18,5;185	1,0	342	18,5
	2	1,01	18,4;184	1,02	338	18,7
	3	1,02	18,3;183	1,04	334	18,7
7	1	1,03	18,2;182	1,06	331	18,74
	2	1,04	18,1;181	1,08	327	18,8
	3	1,05	18,0;180	1,10	324	18,9
Σ		19,19	402	23,67	7715	331
$\bar{\mu}_x$		0,91	19,16	1,13	367	15,79

Підставимо дані з таблиці 3.40 в систему рівнянь (2.12).

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=245,11$; $b_1 = -54,73$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 50,62 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 11,3 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера за виразом (2.42). Рівняння регресії адекватне при $F_p = 1,24 \leq F_{\text{табл.}} = 2,1$.

Таблиця 3.41

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HВ = f(S_E)$ у вигляді квадратичної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/П		$[S_E], \%$ за масою x	$[HВ],$ кг/мм ² ; МПа y	x^2	x^3	x^4	xy	y^2	yx^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	0,75	22,6;226	0,56	0,42	0,315	16,95	511	12,65
	2	0,77	22,3;223	0,59	0,45	0,346	17,17	497	13,16
	3	0,79	21,8;218	0,62	0,49	0,387	17,22	475	13,51

1		2	3	4	5	6	7	8	9
2	1	0,80	21,5;215	0,64	0,51	0,408	17,2	462	13,76
	2	0,82	21,3;213	0,67	0,55	0,451	17,46	453	14,27
	3	0,83	20,9;209	0,68	0,57	0,473	17,34	436	14,21
3	1	0,85	20,6;206	0,72	0,61	0,518	17,51	424	14,83
	2	0,87	20,4;204	0,75	0,65	0,565	17,74	416	15,3
	3	0,89	20,2;202	0,79	0,71	0,632	17,97	402	15,95
4	1	0,90	20,1;201	0,81	0,72	0,684	18,0	402	16,28
	2	0,92	20;200	0,84	0,77	0,701	18,4	400	16,80
	3	0,94	19,9;199	0,88	0,83	0,780	18,7	396	17,50
5	1	0,95	19,8;198	0,90	0,86	0,817	18,81	392	17,82
	2	0,97	19,7;197	0,94	0,91	0,887	19,11	388	18,51
	3	0,99	19,6;196	0,98	0,97	0,961	19,41	384	19,21
6	1	1,0	19,5;195	1,0	1,0	1,0	19,5	380	19,50
	2	1,01	19,4;194	1,02	1,03	1,04	19,59	376	19,78
	3	1,02	19,3;193	1,04	1,06	1,08	19,68	372	20,07
7	1	1,03	19,2;192	1,06	1,09	1,12	19,77	368	20,35
	2	1,04	19,1;191	1,08	1,12	1,16	19,86	364	20,62
	3	1,05	19;190	1,10	1,15	1,20	19,95	361	20,90
Σ		19,19	426	23,67	103	18,52	2087	8257	355
μ _x		0,91	20,29	1,13	4,88	0,88	99,38	393	16,9

Виконаємо підстановку даних з таблиці 3.41 в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=789$; $b_1=1589$; $b_2=1098$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=159 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=320 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2}=221 \geq t_{табл.}=2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера (вираз (2.43)), якщо $F_p=0,00024 \leq F_{табл.}=2,1$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.42

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $HВ = f(S_E)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		[S _E], % за масою x	[H _B], кг/мм ² ; МПа y	x ²	x ³	x ⁴	x ⁵	x ⁶	y ²	x·y	yx ³
1	1	0,75	21,8;218	0,56	0,42	0,315	0,236	0,17	475	16,35	9,15
	2	0,77	21,6;216	0,59	0,45	0,346	0,266	0,21	466	16,63	9,72
	3	0,79	21,3;213	0,62	0,49	0,387	0,305	0,24	453	16,82	10,4
2	1	0,80	20,1;201	0,64	0,51	0,408	0,326	0,26	404	16,08	10,2
	2	0,82	19,9;199	0,67	0,55	0,451	0,369	0,30	396	16,31	10,9
	3	0,83	19,7;197	0,68	0,57	0,473	0,392	0,32	388	16,35	11,2
3	1	0,85	19,5;195	0,72	0,61	0,518	0,440	0,37	380	16,57	11,8
	2	0,87	19,1;191	0,75	0,65	0,565	0,491	0,43	364	16,61	12,4
	3	0,89	18,7;187	0,79	0,71	0,632	0,562	0,50	349	16,64	13,3
4	1	0,90	18,5;185	0,81	0,72	0,684	0,615	0,55	342	16,65	13,3
	2	0,92	17,9;179	0,84	0,77	0,701	0,644	0,59	320	16,46	13,7
	3	0,94	17,6;176	0,88	0,83	0,780	0,733	0,68	309	16,54	14,6
5	1	0,95	17,2;172	0,90	0,86	0,817	0,776	0,73	295	16,34	14,7
	2	0,97	16,9;169	0,94	0,91	0,887	0,860	0,83	285	16,39	15,4
	3	0,99	16,7;167	0,98	0,97	0,961	0,951	0,94	278	16,53	16,2
6	1	1,0	16,5 165	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	272	16,5	16,5
	2	1,01	16,2;162	1,02	1,03	1,04	1,05	1,06	262	16,52	15,6
	3	1,02	15,9;159	1,04	1,06	1,08	1,10	1,12	253	16,21	16,8
7	1	1,03	15,6;156	1,06	1,09	1,12	1,15	1,18	243	16,06	17,0
	2	1,04	15,4;154	1,08	1,12	1,16	1,16	1,20	237	16,01	17,2
	3	1,05	15,3;153	1,10	1,15	1,20	1,26	1,32	234	16,06	17,5
Σ		19,19	365	23,67	103	18,52	14,68	13,9	7005	328	287
μ _x		0,91	17,37	1,13	4,88	0,88	0,69	0,66	333	15,62	13,7

Підставимо дані з таблиці 3.42 в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0 = 833$; $b_1 = -1825$; $b_2 = -1315,7$; $b_3 = -105,48$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 207,7 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p1} = 429 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p2} = 309 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$; $t_{p3} = 24,7 \geq t_{\text{табл.}} = 2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера (вираз (2.42)). Якщо $F_p = 0,000020 \leq F_{\text{табл.}} = 2,2$ – рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.43

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(\text{HB})$ у вигляді лінійної функції $y = b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		$[\sigma_B]$, кг/мм ² ; МПа y	$[\text{HB}]$, кг/мм ² ; МПа x	y^2	x^2	xy
1	2	3	4	6	7	
1	1	10;100	14;140	100	196	140
	2	10,5;105	14,5;145	110	210	152
	3	10,8;108	14,7;147	116	216	158
2	1	11;110	15;150	121	225	165
	2	11,6;116	15,5;155	134	240	179
	3	11,8;118	15,6;156	139	243	184
3	1	12;120	16 ; 160	144	256	256
	2	12,5;125	16,4;164	156	268	268
	3	12,8;128	16,7;167	164	278	278
4	1	13,2;132	17;170	174	289	289
	2	13,5;135	17,5;175	182	306	306
	3	13,7;137	17,8;178	187	316	316
5	1	13,8;138	18;180	190	324	324
	2	14,1;141	18,4;184	203	338	338
	3	14,4;144	18,7;187	207	349	349

1		2	3	4	5	6
6	1	14,6;146	19;190	213	361	361
	2	14,7;147	19,2;192	216	368	369
	3	14,9;149	19,4;194	222	376	376
7	1	15;150	19,6;196	225	384	384
	2	15,1;151	19,8;198	228	392	392
	3	15,2;152	20;200	231	400	400
Σ		260	362	1293	6332	5984
$\bar{\mu}_x$		12,41	17,27	61,59	301	284

Підставляємо дані з таблиці 3.43 в систему рівнянь (2.12).

Після розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=-4,37$; $b_1=0,104$. За t -критерієм Стьюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=3,12 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=3,46 \geq t_{табл.}=2,08$. то коефіцієнти регресії значущі. За t -критерієм Фішера за виразом (2.42) при $F_p=0,036 \leq F_{табл.}=2,1$ рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.44

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_b = f(HB)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/П		$[\sigma_b]$, кг/мм ² ; МПа y	$[HB]$, кг/мм ² ; МПа x	y^2	x^3	x^4	x^2	xy	yx^2
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
1	1	12;120	14;140	144	1728	20736	196	168	2016
	2	12,4;124	14,5;145	154	1906	23642	210	179	2233
	3	12,7;127	14,7;147	161	2046	25984	216	187	2366

1		2	3	4	5	6	7	8	9
2	1	13;130	15;150	169	2197	28561	225	195	2535
	2	13,5;135	15,5;155	182	2457	33169	240	209	2821
	3	13,8;138	15,6;156	190	2622	36183	243	215	2964
3	1	14,2;142	16 ; 160	202	2868	40725	256	227	3232
	2	14,5;145	16,4;164	210	3045	44152	268	237	3444
	3	14,9;149	16,7;167	222	3307	49274	278	248	3707
4	1	15,3;153	17;170	234	3580	54774	289	260	3978
	2	15,6;156	17,5;175	243	3790	59124	306	273	4252
	3	15,8;158	17,8;178	249	3934	62157	316	281	4432
5	1	16,1;161	18;180	259	4169	67120	324	289	4662
	2	16,3;163	18,4;184	265	4319	70399	338	299	4770
	3	16,4;164	18,7;187	268	4395	72078	349	306	5011
6	1	16,5;165	19;190	272	4488	75779	361	313	5168
	2	16,6;166	19,2;192	275	4565	75779	368	318	5280
	3	16,7;167	19,4;194	278	4643	77538	376	324	5393
7	1	16,8;168	19,6;196	282	4737	79581	384	329	5527
	2	16,9;169	19,8;198	285	4816	81390	392	334	5643
	3	17;170	20;200	289	4913	83521	400	340	5780
Σ		317	362	4833	70130	1058128	6335	329207	85214
μ _x		15,1	17,27	230	3339	50387	301,6	15676	3550

Підставляємо дані з таблиці 3.44 в систему рівнянь (2.23).

Розв'язавши системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=11,15$; $b_1=-0,73$; $b_2=0,0006$. За t -критерієм Ст'юдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{po}=44,6 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p1}=2,92 \geq t_{табл.}=2,08$; $t_{p2}=2,1 \geq t_{табл.}=2,08$, то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розрахована за виразом (2.43). Якщо $F_p=1,14 \leq F_{табл}=2,1$, то рівняння регресії адекватне.

Таблиця 3.45

Обробка даних у відповідності з МНК для залежності $\sigma_B = f(HB)$ у вигляді кубічної параболи $y = b_3x^3 + b_2x^2 + b_1x + b_0$ для визначення параметрів

№ з/п		$[\sigma_B],$ кг/мм ² ; МПа y	$[HB],$ кг/мм ² ; МПа x	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	y^2	xy	yx^3
1	1	17,2;172	14;140	196	1728	20736	0,236	0,17	295	375	29721
	2	17,6;176	14,5;145	210	1906	23642	0,266	0,21	309	380	33545
	3	17,9;179	14,7;147	216	2046	25984	0,305	0,24	320	381	36623
2	1	18,2;182	15;150	225	2197	28561	0,326	0,26	331	365	39985
	2	18,5;185	15,5;155	240	2457	33169	0,369	0,30	342	368	45454
	3	18,7;187	15,6;156	243	2622	36183	0,392	0,32	349	368	49031
3	1	18,8;188	16 ; 160	256	2868	40725	0,440	0,37	353	366	53918
	2	18,9;189	16,4;164	268	3045	44152	0,491	0,43	357	359	57559
	3	18,9;189	16,7;167	278	3307	49274	0,562	0,50	357	353	62502
4	1	19;190	17;170	289	3580	54774	0,615	0,55	361	351	68020
	2	19,1;191	17,5;175	306	3790	59124	0,644	0,59	364	342	72389
	3	19,2;192	17,8;178	316	3934	62157	0,733	0,68	368	337	75532
5	1	19,3;193	18;180	324	4169	67120	0,776	0,73	372	332	80461
	2	19,5;195	18,4;184	338	4319	70399	0,860	0,83	380	329	84220
	3	19,7;197	18,7;187	349	4395	72078	0,951	0,94	388	329	86581
6	1	19,8;198	19;190	361	4488	75779	1,0	1,0	392	326	88862
	2	20,4;204	19,2;192	368	4565	75779	1,05	1,06	416	330	93126
	3	20,8;208	19,4;194	376	4643	77538	1,10	1,12	432	330	96574
7	1	21,4;214	19,6;196	384	4737	79581	1,15	1,18	457	333	101371
	2	21,7;217	19,8;198	392	4816	81390	1,16	1,20	470	334	104507
	3	22;220	20;200	400	4913	83521	1,26	1,32	484	336	108086
Σ		317	362	362	70130	1058128	14,68	13,9	$4,2 \cdot 10^5$	7324	1468549
$\bar{\mu}_x$		15,1	17,27	17,2	3339	50387	0,69	0,66	$2 \cdot 10^5$	348	69930

Дані з таблиці 3.45 підставимо в систему рівнянь (2.25).

При розв'язку системи рівнянь отримаємо коефіцієнти $b_0=21,43$; $b_1=-0,389$; $b_2=0,0027$; $b_3=-0,000043$. За t -критерієм Стюдента (рівняння (2.41)), якщо $t_{p0} = 85,72 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p1} = 2,5 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p2} = 92 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$; $t_{p3} = 62 \geq t_{\text{табл.}}=2,08$,

то коефіцієнти регресії значущі. Адекватність рівняння регресії розраховуємо за t -критерієм Фішера за виразом (2.42). При $F_p = 0,00049 \leq F_{\text{табл}} = 2.2$ рівняння регресії адекватне.

3.2. Кореляційні залежності механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу

Вихідні дані для проведення кореляційного дослідження механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу наведені в (Додатку 1) табл. Д.1.

Для визначення тісноти зв'язку між досліджуваними показниками розраховували матрицю парних коефіцієнтів кореляції, які наведені в табл. 3. 46 і табл. 3.47.

Таблиця 3.46

Матриця коефіцієнтів кореляції парних залежностей $\sigma_B = f(x)$

	σ_B	ФП	$\Gamma_{\text{раз.}}$	C	Si	Mn	S	P
σ_B	1	0,138	-0,029	0,011	-0,134	-0,062	0,087	0,00005
ФП	0,138	1	-0,044	0,0474	-0,088	0,0022	0,045	0,056
$\Gamma_{\text{раз}}$	-0,029	-0,044	1	0,0154	-0,014	-0,013	0,028	0,110
C	0,11	0,0474	0,015	1	-0,127	0,010	-0,078	-0,032
Si	-0,134	-0,088	-0,138	-0,127	1	0,056	-0,125	-0,074
Mn	-0,062	0,0022	-0,013	0,011	0,056	1	-0,034	0,0025
S	0,087	0,045	0,028	-0,078	-0,125	-0,034	1	0,0168
P	0,00005	0,056	0,010	-0,032	-0,074	0,0025	0,116	1

Таблиця 3.47

Матриця коефіцієнтів кореляції парних залежностей $HB = f(x)$

	HB	ФП	$\Gamma_{\text{раз}}$	C	Si	Mn	S	P
HB	1	0,140	0,085	0,06	-0,075	-0,039	0,081	-0,006
ФП	0,140	1	-0,044	0,047	-0,088	0,002	0,045	-0,056
$\Gamma_{\text{раз}}$	0,0852	-0,044	1	0,015	-0,014	-0,013	0,028	-0,110
C	0,060	0,047	0,0154	1	-0,127	0,0107	-0,078	-0,032
Si	-0,075	-0,088	-0,014	-0,127	1	0,056	-0,125	-0,074
Mn	-0,0039	0,002	-0,013	0,011	0,057	1	-0,034	-0,002
S	0,0817	0,045	0,028	-0,078	-0,125	-0,034	1	-0,168
P	-0,0064	0,056	0,110	-0,032	-0,074	0,0025	0,016	1

За допомогою методів математичної статистики отримані математичні моделі (рівняння регресії) залежностей механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу, які наведені в табл. 3.48 [20].

Коефіцієнти кореляції для рівнянь регресії розраховували за рівняннями (2.27) і (2.35), а кореляційне відношення за рівнянням (2.32).

Таблиця 3.48

Кореляційні залежності механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу і структури [20]

№ з/п	Залежність механічних властивостей	Математична модель (рівняння регресії)	Коефіцієнт кореляції, кореляційне відношення
1	2	3	4
	$\sigma_B = f(C)$		
1	лінійна	$y = -7,79x + 42,85$	0,28; 0,27
2	квадратична	$y = 0,94x^2 + 15,0x + 54,98$	0,27
3	кубічна	$y = 0,98x^3 - 7,88x^2 + 16,0x + 22,99$	0,28
	$\sigma_B = f(Si)$		
1	лінійна	$y = -1,72x + 18,0$	0,14; 0,14
2	квадратична	$y = 0,45x^2 - 3,34x + 20,1$	0,14
3	кубічна	$y = 1,97x^3 - 10,98x^2 + 20,73x + 3,45$	0,14
	$\sigma_B = f(C + Si)$		
1	лінійна	$y = 2,57x + 28,34$	0,25; 0,26
2	квадратична	$y = 1,21x^2 - 15,87x + 70,21$	0,26
3	кубічна	$y = 0,0045x^3 + 1,31x^2 + 16,86x + 69,72$	0,26
	$\sigma_B = f(Mn)$		
1	лінійна	$y = 2,11x + 12,78$	0,14; 0,14
2	квадратична	$y = 1,043x^2 - 0,009x + 13,73$	0,15
3	кубічна	$y = 2,27x^3 - 6,52x^2 + 7,63x + 11,35$	0,15

1	2	3	4
	$\sigma_B = f(S)$		
1	лінійна	$y = 26,19x + 11,25$	0,18; 0,18
2	квадратична	$y = 171,72x^2 - 15,85x + 13,72$	0,20
3	кубічна	$y = 324,1x^3 - 192,42x^2 + 12,65x + 13,71$	0,19
	$\sigma_B = f(C_E)$		
1	лінійна	$y = 6,78x + 44,85$	0,33; 0,32
2	квадратична	$y = 3,28x^2 - 36,10x + 105$	0,32
3	кубічна	$y = 0,23x^3 - 0,52x^2 - 14,98x + 71,89$	0,32
	$\sigma_B = f(S_E)$		
1	лінійна	$y = -6,18x + 45,41$	0,15; 0,15
2	квадратична	$y = 3,18x^2 - 34,70x + 48$	0,16
3	кубічна	$y = 0,22x^3 - 0,55x^2 - 0,15x + 72,89$	0,16
	$HB = f(C)$		
1	лінійна	$y = 38,78x + 306$	0,20; 0,20
2	квадратична	$y = 43,35x^2 - 351,45x + 867$	0,18
3	кубічна	$y = 9,36x^3 - 52,24x^2 + 47,25x + 550$	0,18
	$HB = f(Si)$		
1	лінійна	$y = 15,42x + 196$	0,19; 0,19
2	квадратична	$y = -3,59x^2 - 0,35x + 180$	0,18
3	кубічна	$y = 14,28x^3 - 93,81x^2 + 183,73x + 55,25$	0,18
	$HB = f(C+Si)$		
1	лінійна	$y = -20,29x + 279,96$	0,25; 0,26
2	квадратична	$y = 2,28x^2 - 46,35x + 354$	0,26
3	кубічна	$y = 0,49x^3 + 10,98x^2 - 97,3x + 453$	0,26
	$HB = f(Mn)$		
1	лінійна	$y = 14,10x + 165,78$	0,15; 0,15
2	квадратична	$y = 15,88x^2 - 15,98x + 165,75$	0,14

1	2	3	4
3	кубічна	$y = 15,53x^3 - 37,85x^2 + 37,14x + 149,65$	0,14
	HB=f(S)		
1	лінійна	$y = 195,35x + 140,35$	0,23; 0,22
2	квадратична	$y = 2489x^2 - 427x + 178,8$	0,23
3	кубічна	$y = -63801x^3 + 33488x^2 - 3277x + 290$	0,25
	HB=f(C _E)		
1	лінійна	$y = -45,31x + 363,18$	0,31; 0,30
2	квадратична	$y = 33,98x^2 - 337,89x + 983,37$	0,28
3	кубічна	$y = 3,32x^3 - 17,89x^2 - 67,78x + 550$	0,38
	HB=f(S _E)		
1	лінійна	$y = -54,73x + 245,14$	0,06; 0,06
2	квадратична	$y = 1098x^2 + 1589x + 789,28$	0,03
3	кубічна	$y = -105,48x^3 - 1315,7x^2 - 1825x + 833$	0,03
	$\sigma_B = f(HB)$		
1	лінійна	$y = 0,104x - 4,37$	0,75; 0,75
2	квадратична	$y = 0,0006x^2 - 0,73x + 11,15$	0,75
3	кубічна	$y = -0,000043x^3 + 0,0027x^2 - 0,389x + 21,43$	0,76

Аналіз даних табл. 3.48 показує, що коефіцієнти парної кореляції і кореляційні відношення несуттєво відрізняються один від одного. Так, як число випадків в досліджуваній вибірці ($n > 100$), при рівні значимості $\alpha = 0,05$ і числу степенів свободи майже всі розраховані вибіркові коефіцієнти кореляції статистично значущі.

РОЗДІЛ 4. АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

За розрахунковими даними у середовищі Microsoft Excel, будували кореляційні поля, емпіричні і теоретичні лінії регресії для досліджуваних функцій. Програма Microsoft Office Excel в режимі кореляції, регресія MS Excel дозволяє одночасно проводити дисперсійний, кореляційний і регресійний аналіз з оцінкою значущості коефіцієнтів отриманих рівнянь регресії [20, 21].

При моделюванні фізичних процесів впливу хімічного складу на механічні властивості та структуру сірого чавуну також можна використовувати пакет програми MathCAD [22, 23].

Коефіцієнти відшукуваних функцій рівнянь регресій можна розраховувати в середовищі MathCAD.

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

Представленні залежності механічних властивостей від хімічного складу, вуглецевого еквіваленту та степені евтектичності наведені на рис. 4.1–4.14. Залежність впливу міцності сірого чавуну на його твердість наведена на рис. 4.15.

4.1. Вплив вмісту вуглецю і кремнію на механічні властивості

сірого чавуну

Залежності механічних властивостей від хімічного складу сірого чавуну наведено на рис. 4.1–4.7.

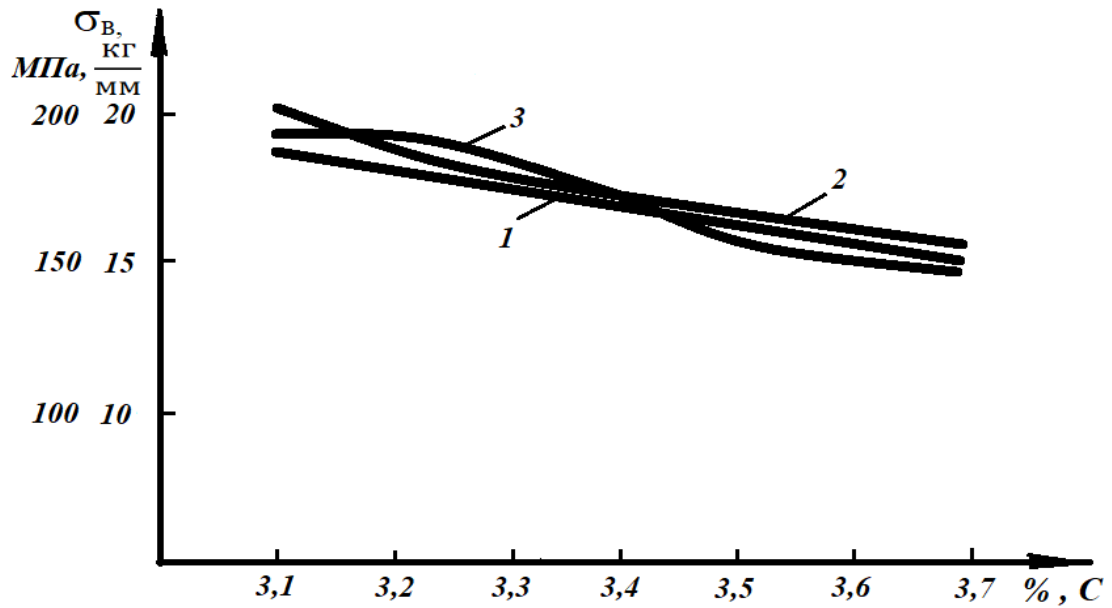


Рис. 4.1. Залежність міцності сірого чавуну від вмісту вуглецю:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

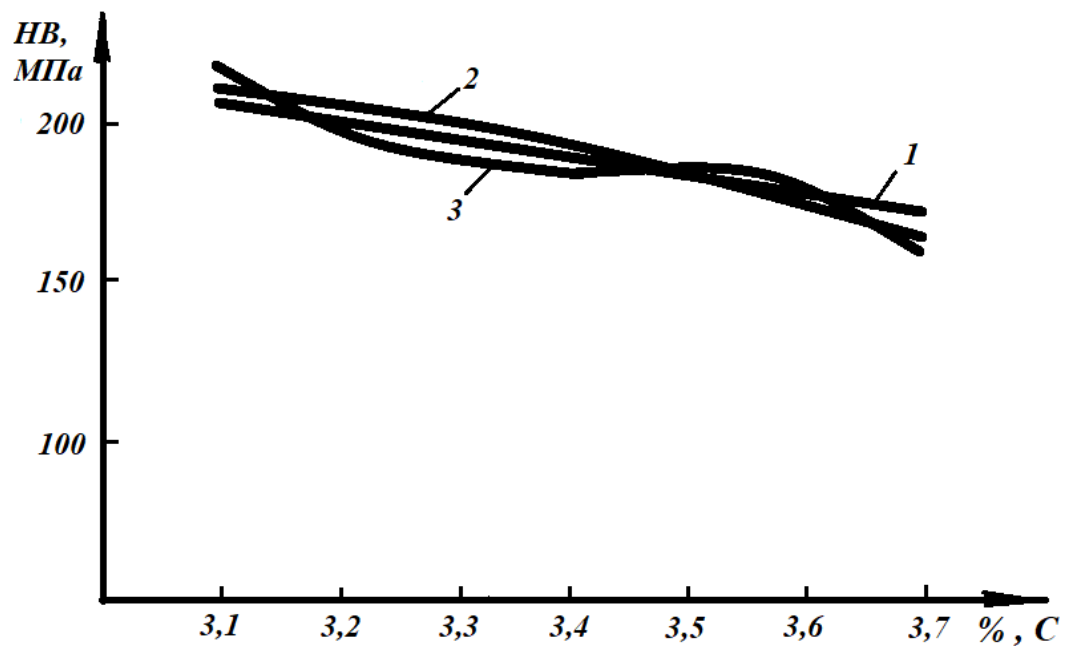


Рис. 4.2. Залежність твердості сірого чавуну від вмісту вуглецю:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

З рис. 4.1-4.2 видно, що збільшення вмісту вуглецю знижує міцність і твердість сірого чавуну, що погоджується з літературними даними. Необхідно зазначити, що залежності міцності і твердості в досліджуваному інтервалі вмісту вуглецю мають однаковий характер. Коефіцієнти кореляції $r_1=0,28$;

$r_2=0,20$ і кореляційного відношення $r_1=0,27$, $r_2=0,28$; $r_1=0,18$, $r_2=0,18$ статистично значущі.

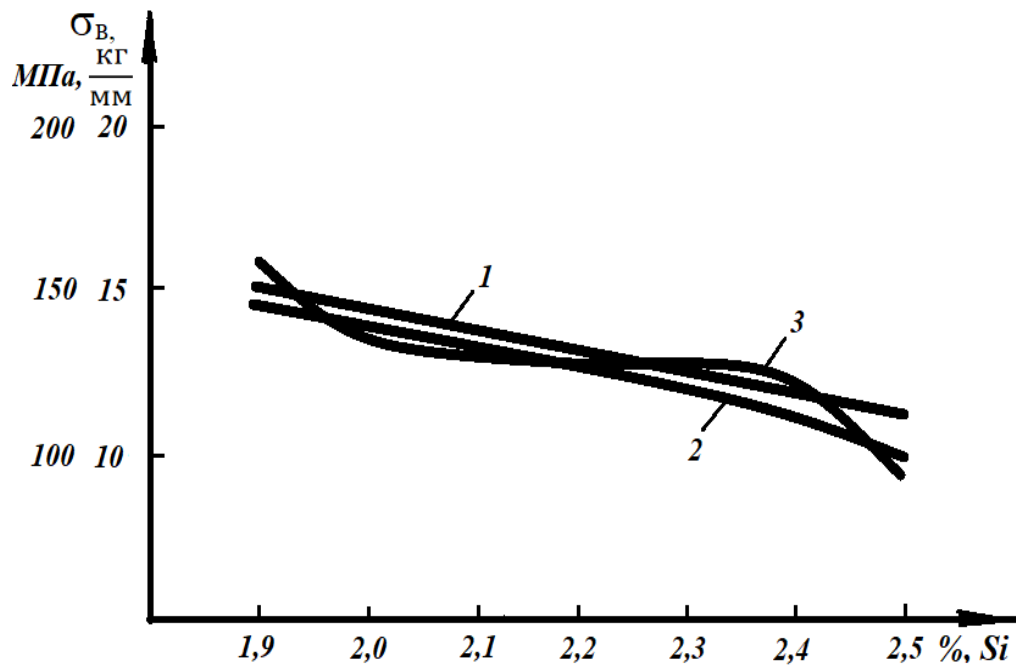


Рис. 4.3. Залежність міцності сірого чавуну від вмісту кремнію:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

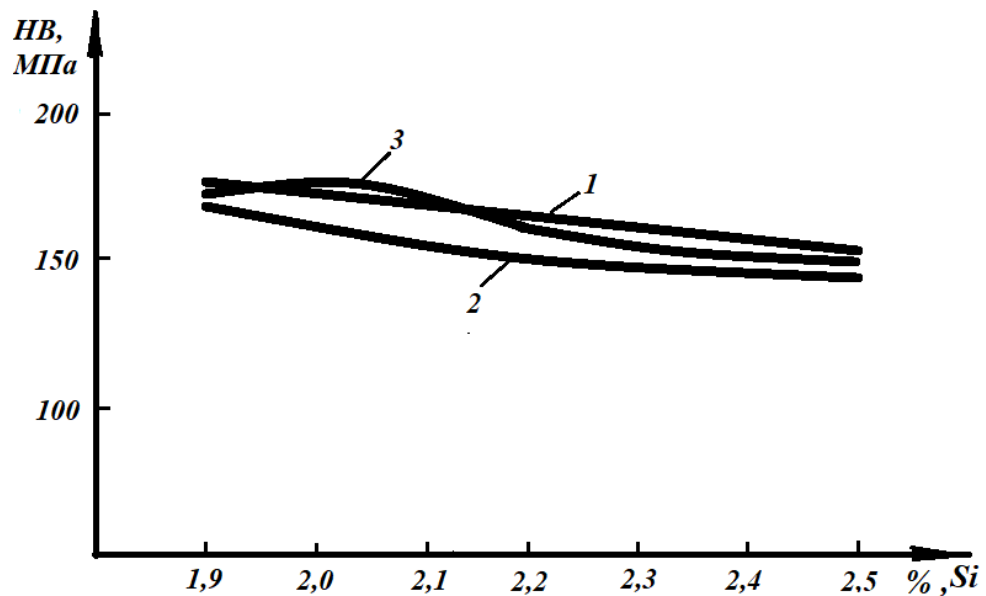


Рис. 4.4. Залежність твердості сірого чавуну від вмісту кремнію:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

З рис. 4.3-4.4 видно, що збільшення кремнію також знижує міцність та твердість сірого чавуну, а коефіцієнти кореляції в цьому випадку значно менші,

ніж у випадку впливу вуглецю на механічні властивості. При цьому характер залежностей менш стабільний. Коефіцієнти кореляції $r_1=0,14$, $r_2=0,19$ і кореляційного відношення $r_1=0,14$, $r_2=0,14$; $r_1=0,18$, $r_2=0,18$ статистично значущі.

4.2. Вплив сумарного вмісту вуглецю і кремнію на механічні властивості сірого чавуну

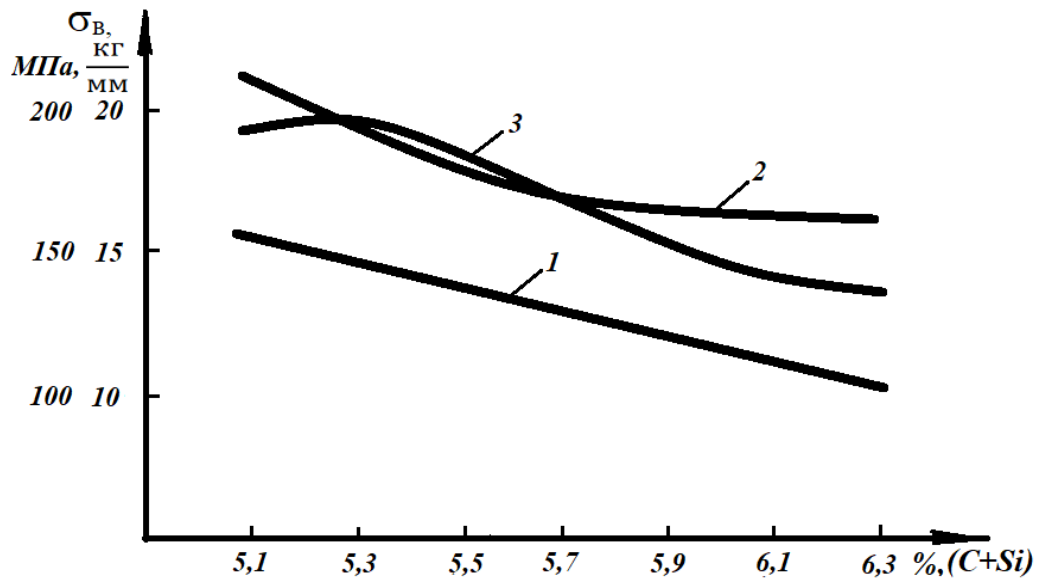


Рис. 4.5. Залежність міцності сірого чавуну від сумарного вмісту вуглецю і кремнію:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

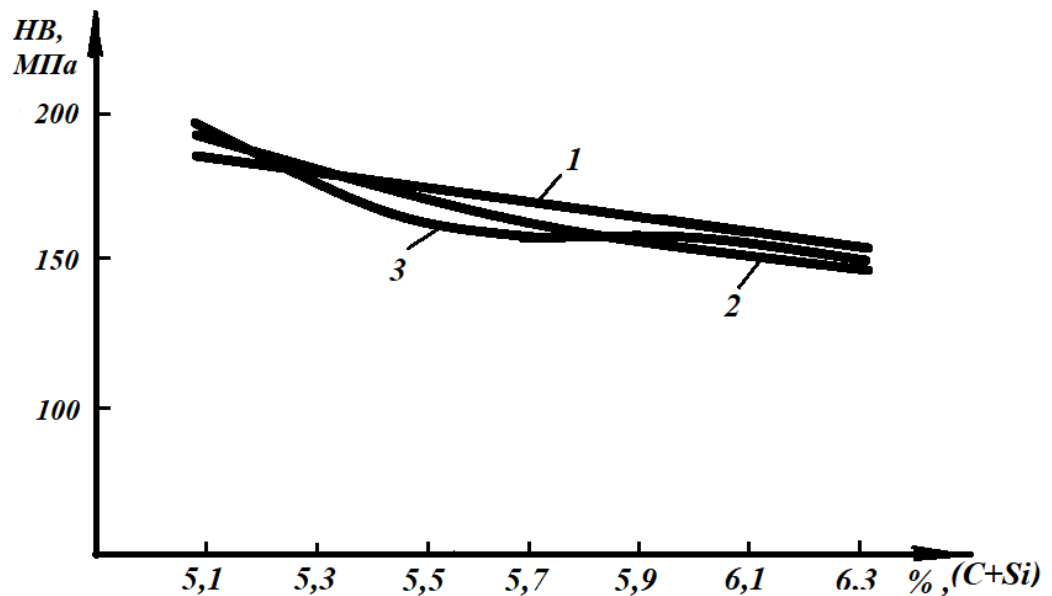


Рис. 4.6. Залежність твердості сірого чавуну від сумарного вмісту вуглецю і кремнію: 1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

Вплив сумарного вмісту вуглецю і кремнію на механічні властивості сірого чавуну наступний: він суттєво знижує міцність і твердість сірого чавуну (рис. 4.5-4.6). Ці залежності характеризуються більш високими статистично значимими коефіцієнтами кореляції $r_1=0,25$, $r_2=0,26$ і кореляційного відношення $r_1=0,26$, $r_2=0,26$; $r_1=0,26$, $r_2=0,26$.

4.3. Вплив вмісту марганцю і сірки на механічні властивості сірого чавуну

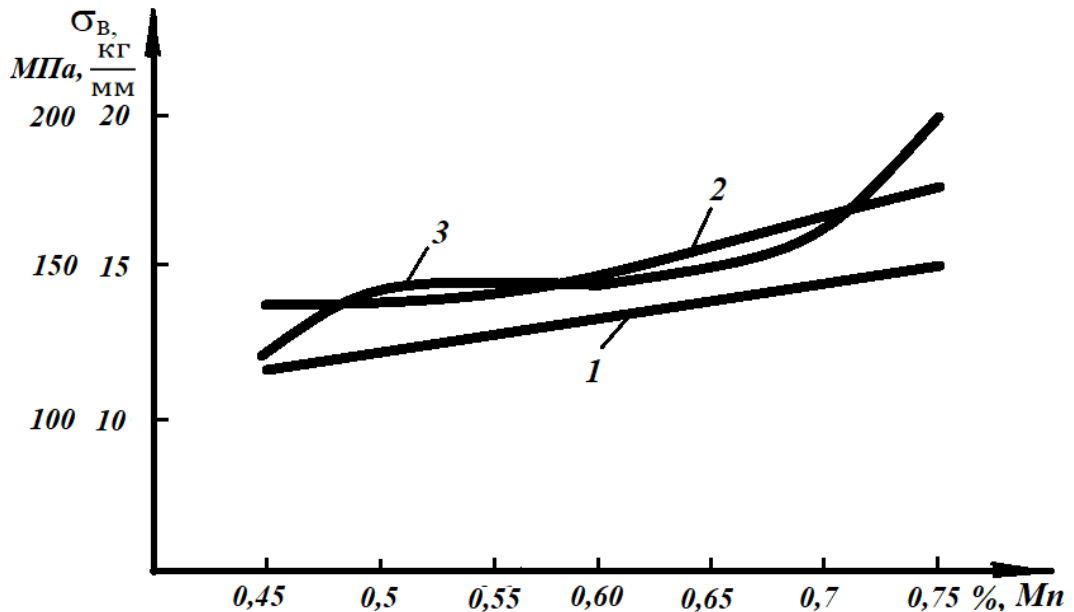


Рис. 4.7. Залежність міцності сірого чавуну від вмісту марганцю:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

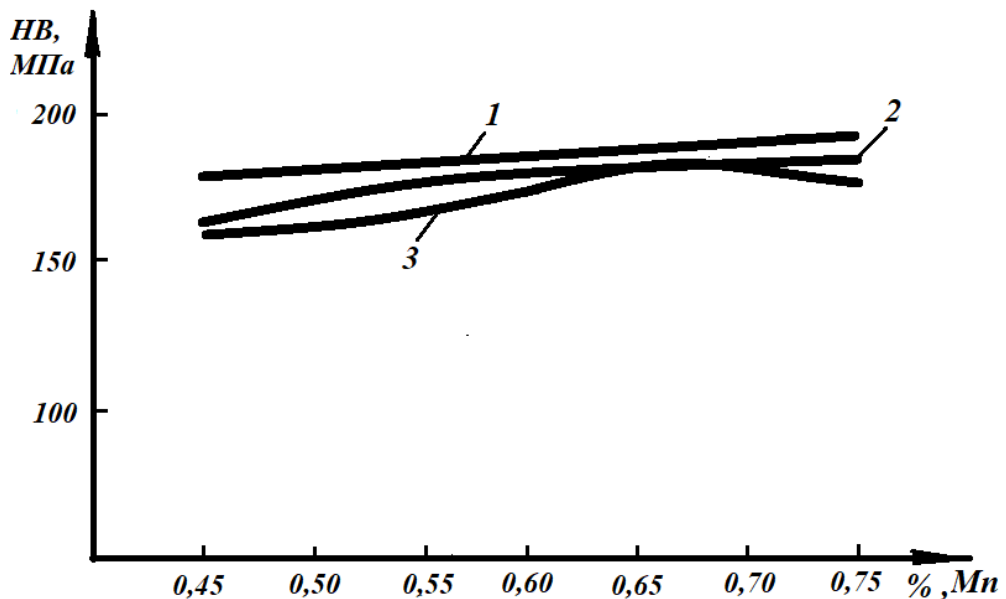


Рис. 4.8. Залежність твердості сірого чавуну від вмісту марганцю:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

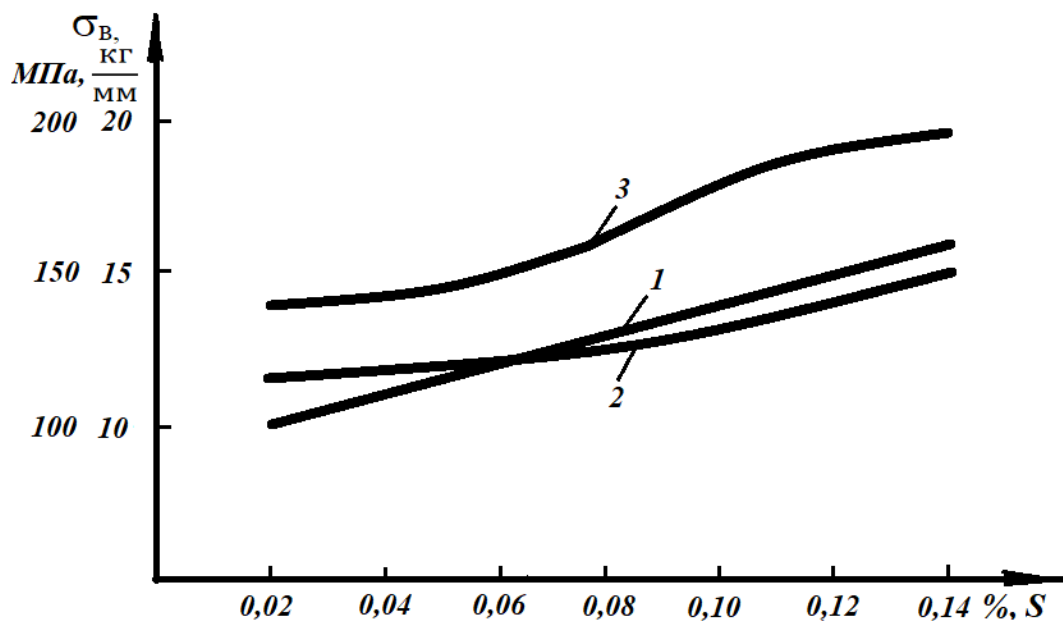


Рис. 4.9. Залежність міцності сірого чавуну від вмісту сірки:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

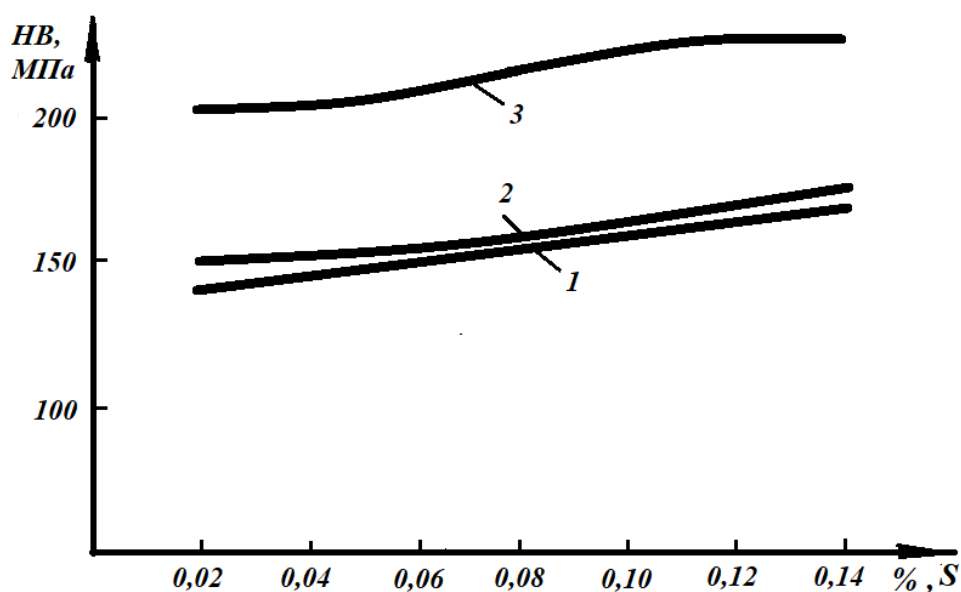


Рис. 4.10. Залежність твердості сірого чавуну від вмісту сірки:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

Як видно з рис. 4.7-4.10, аналіз впливу окремо вмісту марганцю і сірки на міцність і твердість сірого чавуну показує, що зі збільшенням їх вмісту спостерігається збільшення міцності і твердості чавуну. При цьому вплив сірки більш суттєвий, ніж марганцю, що підтверджується і більш високими коефіцієнтами кореляції для залежностей $\sigma_b = f(S)$; $HB = f(S)$; $r_1 = 0,18$; $r_2 = 0,23$, і

кореляційного відношення $r_1=0,20$, $r_2=0,19$; $r_1=0,23$, $r_2=0,25$, а для залежностей $\sigma_B=f(Mn)$; $HB=f(Mn)$ коефіцієнти кореляції менші $r_1=0,14$; $r_2=0,15$ і кореляційні відношення $r_1=0,15$, $r_2=0,15$; $r_1=0,14$ $r_2=0,14$ статистично значущі.

4.4. Вплив вмісту вуглецевого еквіваленту та степені евтектичності на механічні властивості сірого чавуну

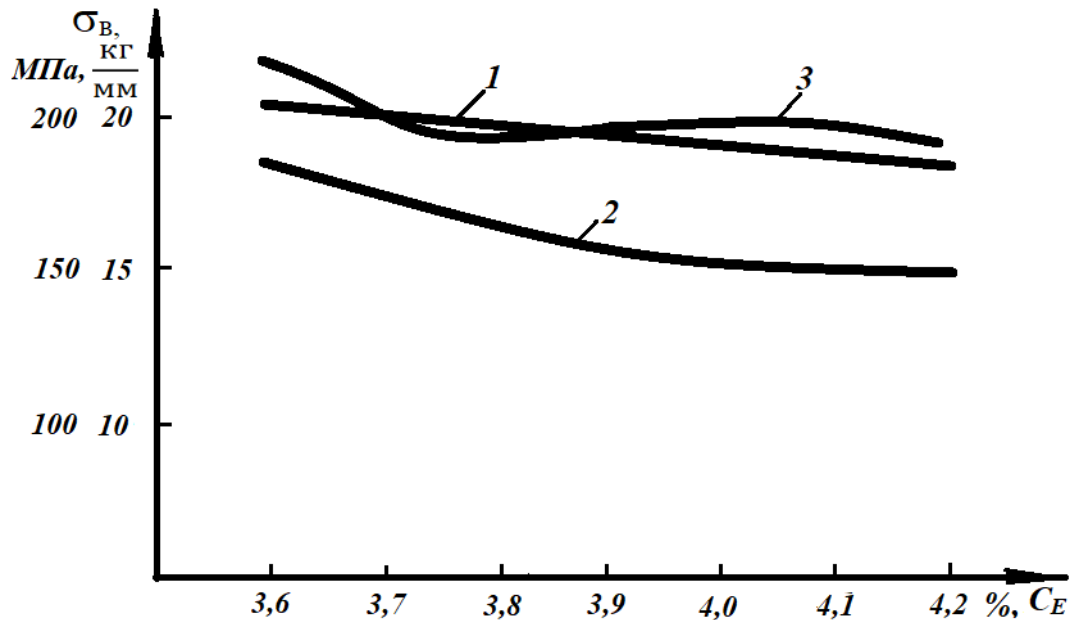


Рис. 4.11. Залежність міцності сірого чавуну від вмісту вуглецевого еквіваленту: 1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

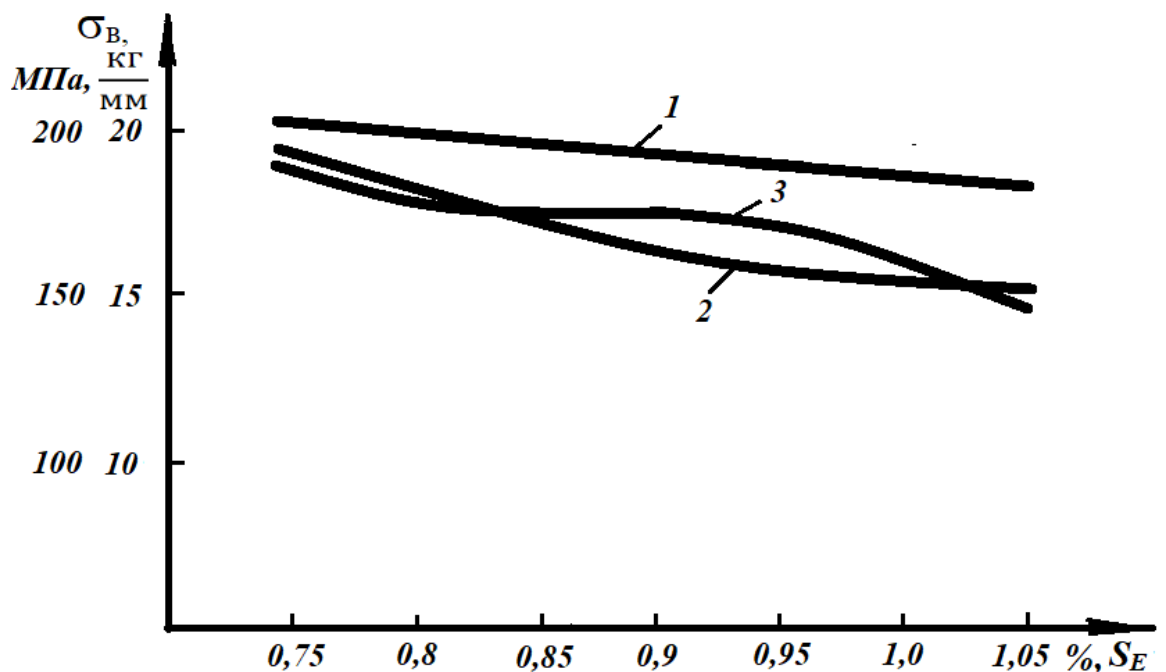


Рис. 4.12. Залежність міцності сірого чавуну від вмісту степеня евтектичності: 1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

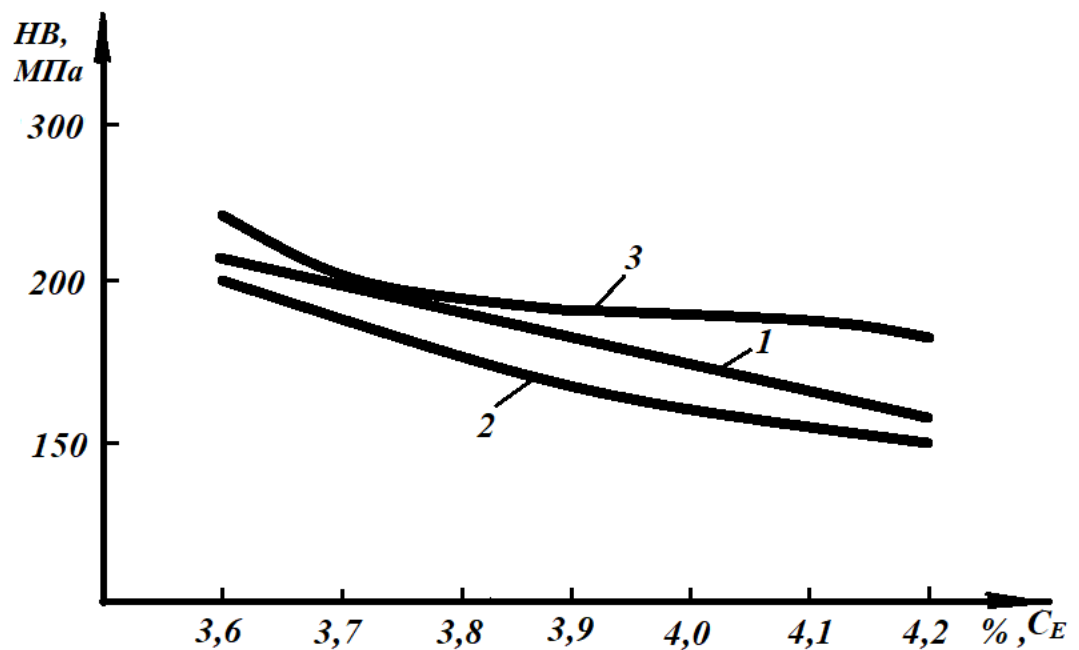


Рис. 4.13. Залежність твердості сірого чавуну від вмісту вуглецевого еквіваленту: 1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

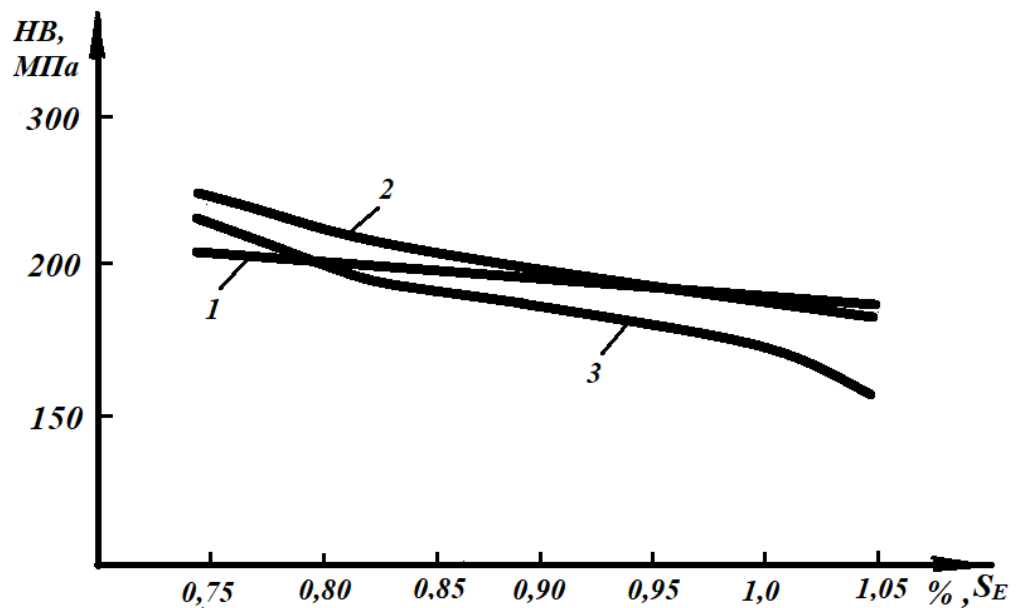


Рис. 4.14. Залежність твердості сірого чавуну від вмісту степеня евтектичності: 1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

Із аналізу рівнянь регресії видно, що зі збільшенням вуглецевого еквіваленту і степені евтектичності міцність і твердість сірого чавуну знижується.

З рис. 4.11-4.14 видно, що збільшення вмісту вуглецевого еквіваленту та степені евтектичності знижує міцність і твердість сірого чавуну, що погоджується з літературними

даними. Необхідно зазначити, що залежності міцності і твердості в досліджуваному інтервалі вмісту вуглецю мають однаковий характер. Для $\sigma_B = f(C_E)$; $HB = f(C_E)$ Коефіцієнти кореляції $r_1=0,33$; $r_2=0,32$; $r_1=0,31$; $r_2=0,30$ статистично значущі і кореляційного відношення $r_1=0,32$, $r_2=0,32$; $r_1=0,28$ $r_2=0,28$ статистично значущі.

Вплив степені евтектичності менш суттєвий, ніж вуглецевого еквіваленту. Це підтверджується залежностями рис. 4.12 і рис. 4.14 та меншими значеннями коефіцієнтів кореляції $r_1=0,15$; $r_2=0,15$; $r_1=0,06$; $r_2=0,06$ для $\sigma_B = f(S_E)$; $HB = f(S_E)$ і кореляційними відношеннями $r_1=0,16$ $r_2=0,16$; $r_1=0,03$ $r_2=0,03$ – вони статистично значущі. Характер залежності наступний: чим більше значення степені евтектичності, тим менша міцність і твердість сірого чавуну.

4.5. Вплив міцності сірого чавуну на його твердість

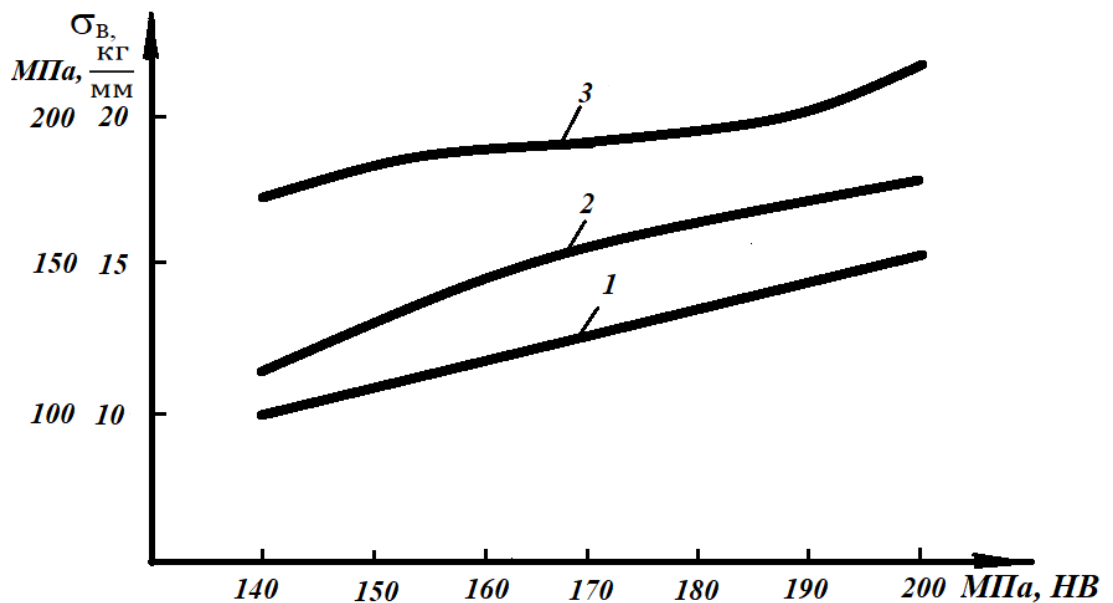


Рис. 4.15. Залежність міцності сірого чавуну від твердості:

1 – лінійна; 2 – квадратична; 3 – кубічна

Із аналізу рівнянь регресії і рис. 4.15 видно, що цей зв'язок впливу міцності на твердість чавуну характеризується високою тісністю зв'язку, оскільки коефіцієнт кореляції дорівнює $r_1=0,75$; $r_2=0,75$ і кореляційного відношення $r_1=0,76$, $r_2=0,75$ статистично значущі. Відповідно надається можливість оцінити міцність чавуну за його твердістю, що дозволяє приймати метод неруйнівного контролю механічних властивостей сірого чавуну.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

5.1. Обґрунтування та розрахунок економічного ефекту

В роботі досліджується вплив хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну. Виливки із сірого чавуну мають різностінність, а елементи хімічного складу впливають на міцність і твердість чавуну. З цих причин виникає брак виливків із сірого чавуну. Так, наприклад, марганець при вмісті більше 0,5% гальмує графітизацію і підвищує схильність сірого чавуну до такого дефекту, як відбіл – це невідповідність по структурі. Він важко піддається механічній обробці.

Потім, наприклад, підвищення вмісту сірки (S) викликає утворення тріщин (хрупкість виливків). Фосфор, утворюючи дво-трифосфідну евтектику впливає, звісно, на підвищення утворення холодних тріщин у виливках із сірого чавуну.

Використання оптимального хімічного складу сірого чавуну надасть змогу зменшити ці види браку, а це, в свою чергу, дає певний економічний ефект.

Для плавки сірого чавуну в індукційно тигельній печі використовується наступна шихта: відходи власного виробництва (чавунний брухт, ливникові системи); сталевий брухт; карбюризатори (бой електродів); феросплави, феросиліцій ФС65, феромарганець ФМн78.

Балансове рівняння металу річного виробництва виливків має наступний вигляд [24]:

$$(П + В)(1 - 0,01У) = Пр + Л + Б + З, \quad (5.1)$$

де $П$ – металозавалка, яка закуповується; $В$ – відходи власного виробництва; $У$ – угар металозавалки у % від маси останньої; $Пр$, $Л$, $Б$, $З$ – придатні виливки, ливники, брак, зливи.

При врахуванні рівності $В = Л + Б + З$ з виразу (5.1) маємо залежність

$$П = (Пр + 0,01У\Delta В) / (1 - 0,01У). \quad (5.2)$$

Рівняння (5.2) продиференціюємо по В при сталих П та У і після інтегрування маємо

$$\Delta\P = 0,01У\Delta B/(1-0,01У), \quad (5.3)$$

де $\Delta\P$ – зміна у покупній шихті при зміні вмісту відходів виробництва на ΔB .

Вартісний баланс річного виробництва виливків має наступний вигляд [24]:

$$З_1 + З_2 + З_3 = C_{\Pi} + C_B, \quad (5.4)$$

де $З_1$ – затрати на шихту; $З_2$ – затрати на переробку (плавлення, формовку, заливку, вибивку); $З_3$ – затрати на обробку виливків; C_{Π} – собівартість виливків річного виробництва; C_B – відходи власного виробництва.

$$З_1 = C_{\Pi} + C_B, \quad (5.5)$$

$$З_{\Pi} = C_{\Pi} \Pi; \quad З_B = C_B \Pi, \quad (5.6)$$

де C_{Π} – вартість 1т покупної шихти; C_B – собівартість 1т власних відходів на витрати цих матеріалів за рік; $З_{\Pi}$ – витрати на покупну частину шихти; $З_B$ – витрати на відходи власного виробництва [24].

Визначення $З_2$

$$З_2 = C_2(\Pi + B), \quad (5.7)$$

де C_2 – вартість переробки 1т металозавалки на річну кількість

$$З_3 = C_3 \Pi, \quad (5.8)$$

де C_3 – вартість обробки 1т виливків на шляху вибивки до готової продукції.

$$C_{\Pi} = c_{\Pi} \Pi; \quad C_B = c_B B, \quad (5.9)$$

де c_{Π} – собівартість 1т придатних виливків; c_B – собівартість 1т відходів власного виробництва [24].

При підстановці виразу (5.6) в (5.5), а результат з виразами (5.7), (5.8) і (5.9) в рівняння (5.4) та після перетворень маємо

$$C_{\text{пр}} = c_{\text{п}} + c_2\Pi + c_2B + c_3\text{Пр} . \quad (5.10)$$

Рівняння (5.2) підставимо у вираз (5.10), продиференціюємо результат по B при сталих $Y, \text{Пр}, c_{\text{п}}, c_2, c_3$, проінтегруємо і отримаємо наступне рівняння для розрахунку економічного ефекту:

$$\Delta C_{\text{пр}} = (0,01Y(c_{\text{п}} + c_2)/(1 - 0,01Y) + c_2)\Delta B. \quad (5.11)$$

Наведемо приклад розрахунку економічного ефекту від зниження вмісту відходів власного виробництва.

Приймаємо кількість ливників 45% від річної виплавки $\Pi = 350$ т/рік за випуском виливків насосів для перекачування рідини:

Кількість ливників приймаємо 43% від річної виплавки Π

$$Л = 0,43\Pi = 0,43 \cdot 350 = 150,5\text{т}. \quad (5.12)$$

Кількість зливів при 1% від річної виплавки Π

$$З = 0,01\Pi = 0,01 \cdot 350 = 3,5\text{т}. \quad (5.13)$$

Кількість браку при 3,3 % від річної виплавки Π

$$Б_1 = 0,033\Pi = 0,033 \cdot 350 = 11,55\text{т}. \quad (5.14)$$

Кількість браку при 2,9 % від річної виплавки Π

$$Б_2 = 0,029\Pi = 0,029 \cdot 350 = 10,15\text{т}. \quad (5.15)$$

Відходи власного виробництва

$$B_1 = Л + З + Б_1 = 150,5 + 3,5 + 11,55 = 165,55\text{т}; \quad (5.16)$$

$$B_2 = Л + З + Б_2 = 150,5 + 3,5 + 10,15 = 164,15\text{т}. \quad (5.17)$$

Зміна відходів власного виробництва, наприклад, при зменшенні браку

$$\Delta B = B_1 - B_2 = 165,55 - 164,15 = 1,4\text{т/рік}, \quad (5.18)$$

тому при зменшенні браку на 0,5% об'єм відходів власного виробництва буде зменшуватись на 1,4 т/рік.

Визначаємо зміну у покупній частині шихти, наприклад, при зміні вмісту відходів власного виробництва

$$\Delta\Pi = \frac{0,01Y\Delta B}{(1-0,01Y)} = \frac{0,01 \cdot 5 \cdot 1,4}{(1-0,01 \cdot 5)} = 0,073 \text{ т/рік}, \quad (5.19)$$

де $Y = 5\%$ – угар металозавалки у відсотках.

Отже, визначаємо економічний ефект від зниження об'єму відходів власного виробництва

$$\Delta E_{\text{еф}} = \left(\frac{0,01Y(c_{\text{п}} + c_2)}{(1-0,01Y)} + c_2 \right) \Delta B \text{ т/рік}, \quad (5.20)$$

де $c_{\text{п}}$ – собівартість покупної шихти; c_2 – вартість переробки 1т металозавалки на рік.

$$\Delta E_{\text{еф}} = \left(\frac{0,01 \cdot 5 \cdot (26076 + 250)}{(1-0,01 \cdot 5)} + 250 \right) \cdot 1,4 = 2253 \text{ гр/рік}. \quad (5.21)$$

Отже, при зниженні браку на 0,5% очікуваний економічний ефект буде становити 2253 гр/рік.

ВИСНОВКИ

Проведені математично-статистичні дослідження впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну показали наступне.

Хімічний склад має суттєвий вплив на структуру, а за її допомогою і на механічні властивості сірого чавуну.

Показано, що негативний вплив на механічні властивості має вуглець і кремній. Чим більший вміст цих елементів, тим нижче міцність і твердість чавуну.

Встановлено, що вплив вуглецю більш суттєвий, ніж кремнію. Більш суттєвий вплив на механічні властивості сірого чавуну має сумарний вміст вуглецю і кремнію, а також вуглецевого еквіваленту. Вплив ступені евтектичності менш суттєвий і стабільний, ніж вплив сумарного вмісту вуглецю і кремнію, а також вуглецевого еквіваленту.

Показано, що позитивний вплив на механічні властивості сірого чавуну має марганець і сірка. Вплив сірки більш суттєвий, ніж марганцю. Висока тіснота зв'язку при позитивному коефіцієнті встановлена між твердістю і міцністю чавуну.

На основі проведених досліджень для підвищення механічних властивостей сірого чавуну пропонується за критерій оцінки хімічного складу чавуну прийняти:

- вуглецевий еквівалент;
- сумарний вміст вуглецю і кремнію;
- вміст марганцю і сірки окремо.

Для одержання сірого чавуну з підвищеними механічними властивостями вуглецевий еквівалент повинен знаходитись в інтервалі 3,6-4,2%, що відповідає вмісту вуглецю 3,1-3,75%, кремнію 1,9-2,5%. Вміст марганцю повинен бути в інтервалі 0,45-0,75%, а сірки 0,04-0,14% згідно ДСТУ8833 марка СЧ150.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сіренко К.А. Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах. Процеси лиття. Одержання та обробка розплавів. №1(147). 2022, С. 3-10.
2. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну. Процеси лиття. №4 (146). 2021, С. 66-75.
3. 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.
4. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквіваленту і ступення евтектичності чавуну в ливарному виробництві. Процеси лиття. №1 (51). 2023, С. 20-34.
5. Іванов В.Г. Вплив кремнію на графітизацію заевтектичного синтетичного чавуну. Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. №1. 2017, С. 17-22.
6. Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступення евтектичності. Метал та лиття України. Т. 31. №2(333). 2023, С.42-50.
7. Лоза А.В., Чигарев В.В., Шишкін В.В., Рассохин Д.А. Вплив кремнію і марганцю на властивості сірого чавуну і стійкість великих слябінгових виливниць з бандажем. Вісник Приазовського Державного технічного університету. Серія: технічні науки. №2 (23). 2011, С. 238-244.
8. 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.
9. Іванов В.Г., Парахневич Є.М., Шустов С.О. Ливарні сплави та плавка чавунів. Методичний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ. 2020, 62с.

10. 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.
11. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва. Метал та лиття України. Т. 29. №4(32). 2021, С.30-40.
12. Бялік Г.А., Наумик В.В., Цивірко Е.І. Практикум з теорії ливарних сплавів та процесів. Навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ. 2013, 98с.
13. Бузило В.І., Сердюк Б.П., Яворський А.В., Гайдай О.А. Матеріалознавство. Навчальний посібник. Дніпро. НТУ «ДП». 2021, 243с.
14. Національний стандарт України. ДСТУ8833. Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальнотехнічні умови. 2019, С.7.
15. Пріщенко О.Л., Черемська Н.В., Черногор Т.Т. Побудова математичних моделей за допомогою методів кореляційного і регресійного аналізу. Вісник національного технічного університету «ХП». Серія: Інноваційні дослідження у наукових роботах. №2 (1362). 2011, С.29-36.
16. Перегуда О.В., Капустяк О.А., Курилко О.Б. Статистична обробка даних. Навчальний посібник. Електронне видання. 2022, 103с.
17. Бахрушин В.С. Методи аналізу даних. Навчальний посібник. Запоріжжя: КПУ. 2011, 268с.
18. Руденко В.М. Математична статистика. Навчальний посібник. К. ЦУЛ. 2012, 304с.
19. Василенко О.А., Сенга І.А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях. Навчальний посібник. Одеса: ОНАО ім. О.С. Попова. 2011, 166с.
20. Босий М.В., Шевченко Б.П., Герасименко І.О., Ботнаренко В.О., Авраменко В.О., Шуть А.О. Дослідження впливу хімічного складу на механічні властивості виливків із сірого чавуну методами математичної статистики // The 8th International scientific and practical conference “Modern

problems of science, education and society” (October 9-11, 2023) SPC “Sciconf.com.ua”, Kyiv, Ukraine. 2023. P. 250-258.

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. Кавецький В.В., Козловський В.О. Економічне обґрунтування інноваційних рішень в машинобудуванні. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2016, 100с.

ДОДАТКИ