

# МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.74: 669

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/11>**Босий М.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Кропивний В.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Кузик О.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Кропивна А.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## ДО ПИТАННЯ ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ НА СТРУКТУРУ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СІРОГО ЧАВУНУ

Застосування виливків із сірого чавуну в машинобудівній промисловості дає змогу підвищити зносостійкість і експлуатаційні властивості конструкцій та деталей машин, що, в свою чергу, також підвищує їх надійність для галузі машинобудування. Наразі значно виріс інтерес до проблем лиття чавуну, тобто формування структури і механічних властивостей. Важливим показником якості сірого чавуну є його механічні властивості, які залежать від його хімічного складу і структури та визначених технологічних процесів. У статті досліджено вплив хімічного складу сірого чавуну на структуру та його механічні властивості. Дослідження виконувались методами математичної статистики, тобто методом найменших квадратів і кореляційним аналізом в середовищі Microsoft Office Excel та MathCAD. Отримані рівняння регресії залежностей механічних властивостей сірого чавуну від його хімічного складу, при цьому встановлена тіснота зв'язку між досліджуваними параметрами і встановлено характер впливу вуглецю, кремнію, марганцю, сірки на механічні властивості сірого чавуну, а також 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 оптимальний хімічний склад сірого чавуну для дослідження механічних властивостей. 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.

**Ключові слова:** сірий чавун, хімічний склад, механічні властивості, рівняння регресії, кореляція, метод найменших квадратів.

**Постановка проблеми.** Використання сірого чавуну в різних галузях промисловості України дозволяє підвищити надійність, зносостійкість і експлуатаційні показники як конструкцій, так і деталей машин. В зв'язку з цим в технологічних процесах одержання чавунного литва необхідно застосовувати певні прийоми і методи регулювання форми та характеру розподілу графітної фази в структурі виливків [1–4, 7].

Теорія кристалізації є важливою складовою при аналізі процесів формування структури і механічних властивостей, тому велика увага приділяється вивченню закономірностей структури і механічних властивостей в залежності від хімічного складу чавуну [1–4, 7].

Під час отримання чавунного литва необхідно приділяти увагу прийомам та методам коригування хімічного складу чавуну, за допомогою яких

регулюється хімічний склад, а також структура виливків з метою покращення їх якості [1–4, 7].

Тому питання стосовно вивчення впливу на механічні властивості виливків із сірого чавуну хімічного складу є актуальним, а робота, яка спрямована на підвищення його міцності і твердості виливків в залежності від хімічного складу наразі є також актуальним науковим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Натепер значно зростає інтерес до процесів лиття чавунів, формування структури та їх механічних властивостей.

При аналізі літературно інформаційних джерел стосовно вивчення впливу на механічні властивості хімічного складу чавуну вказується на широке застосування в машинобудівній галузі зносостійких матеріалів деталей, які створені на основі сірих чавунів [1–4, 7].

Для аналізу технологічних процесів формування структури сірого чавуну може слугувати теорія кристалізації. Вивчення її при процесах лиття тісно пов'язано з дослідженням закономірностей зміни структури і механічних властивостей в залежності від хімічного складу чавуну при різних температурах і фазових станах [1–4, 7].

Тому, наразі актуальним питанням є вивчення впливу хімічного складу як на структуру, так і на механічні властивості сірого чавуну.

**Метою статті** є вивчення впливу хімічного складу на структуру та механічні властивості сірого чавуну.

**Виклад основного матеріалу.** Матеріалом дослідження в нашій роботі є сірий чавун з відповідним хімічним складом ДСТУ 8833: 3,1–3,7 % C; 1,9–2,5 % Si; 0,45–0,75 % Mn; 0,04–0,14 % S; 0,2 % P, який виплавляється в індукційно тигельній печі [1, 7, 9].

Вивчення впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну виконувалось за допомогою методу найменших квадратів (МНК), теорії кореляції та регресійного аналізу [5–7].

Залежність міцності і твердості сірого чавуну від хімічного складу шукаємо у вигляді наступних функцій: лінійної, поліноміальної другого ступеня, поліноміальної третього ступеня [5–7]:

Рівняння регресії, тобто (математичні моделі) залежностей механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу отримуємо, використовуючи методи кореляційного і регресійного аналізу. Обробка даних у відповідності з методом найменших квадратів виконана для залежностей міцності та твердості сірого чавуну від хімічного складу. Розрахунки з використання методів математичної статистики при вивченні впливу хімічного складу на механічні властивості та структуру сірого

чавуну виконували в пакеті програми MathCad. Для здійснення дисперсійного, кореляційного і регресійного аналізу з оцінкою значущості коефіцієнтів одержаних рівнянь регресії використовували програму Microsoft Office Excel [5–8].

Виконавши відповідні розрахунки із застосуванням теорії кореляції та методу найменших квадратів, отримали рівняння регресії залежностей впливу хімічного складу на механічні властивості сірого чавуну [5–8]. Наприклад, для міцності сірого чавуну:

$$\sigma_b = f(C)$$

$$\begin{aligned} \sigma_b &= -7,79C + 42,85 \\ \sigma_b &= 0,94C^2 - 15,0C + 54,98 \\ \sigma_b &= 0,98C^3 - 7,88C^2 + 16,0C + 22,99 \end{aligned} \quad (1)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,28; 0,27; 0,27$$

$$\sigma_b = -1,72 Si + 18,0$$

$$\begin{aligned} \sigma_b = f(Si) \quad \sigma_b &= 0,45Si^2 - 3,34Si + 20,1 \\ \sigma_b &= 1,97Si^3 - 10,98Si^2 + 20,73Si + 3,45 \end{aligned} \quad (2)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,14; 0,14; 0,14$$

$$\sigma_b = f(C + Si)$$

$$\begin{aligned} \sigma_b &= 2,57(C + Si) + 28,34 \\ \sigma_b &= 1,21(C + Si)^2 - 15,87(C + Si) + 70,21 \\ \sigma_b &= 0,00045(C + Si)^3 + 1,31(C + Si)^2 + 16,86(C + Si) + 69,72 \end{aligned} \quad (3)$$

коефіцієнти кореляції  $r = 0,25; 0,26; 0,25$

$$\sigma_b = 2,11Mn + 12,78$$

$$\begin{aligned} \sigma_b = f(Mn) \quad \sigma_b &= 1,043Mn^2 - 0,009Mn + 13,73 \\ \sigma_b &= 2,27Mn^3 - 6,52Mn^2 + 7,63Mn + 11,35 \end{aligned} \quad (4)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,14; 0,15; 0,15$$

$$\sigma_b = 26,19S + 11,25$$

$$\begin{aligned} \sigma_b = f(S) \quad \sigma_b &= 171,72S^2 - 15,85S + 13,72 \\ \sigma_b &= 324,1S^3 - 192,42S^2 + 12,65S + 13,71 \end{aligned} \quad (5)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,18; 0,20; 0,19$$

$$\sigma_b = 6,78C_E + 44,85$$

$$\begin{aligned} \sigma_b = f(C_E) \quad \sigma_b &= 3,28C_E^2 - 36,1C_E + 105 \\ \sigma_b &= 0,23C_E^3 - 0,52C_E^2 - 14,98C_E + 71,89 \end{aligned} \quad (6)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,33; 0,32; 0,32$$

$$\sigma_b = f(S_E) \quad \begin{aligned} \sigma_b &= -6,18S_E + 45,41 \\ \sigma_b &= 3,18S_E^2 - 34,70S_E + 48 \\ \sigma_b &= 0,23S_E^3 - 0,52S_E^2 - 14,98S_E + \\ &+ 72,98 \end{aligned} \quad (7)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,15; 0,16; 0,16$$

Для твердості сірого чавуну:

$$HB = 38,78C + 306$$

$$HB = f(C) \quad \begin{aligned} HB &= 43,35C^2 - 351,48C + 867 \\ HB &= 9,36C^3 - 52,24C^2 + 47,25 + \\ &+ 550 \end{aligned} \quad (8)$$

коефіцієнти кореляції  $r = 0,20; 0,18; 0,18$ 

$$HB = f(Si)$$

$$HB = 15,42Si + 196$$

$$HB = -3,59 \cdot Si^2 - 0,35 \cdot Si + 180$$

$$HB = 14,28Si^3 - 93,81Si^2 + \\ + 183,73Si + 55,25 \quad (9)$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,19; 0,18; 0,18$$

$$HB = f(Mn)$$

$$HB = 14,10Mn + 165,78$$

$$HB = 15,88Mn^2 - 15,98Mn + 165,75 \quad (10)$$

$$HB = 15,53Mn^3 - 37,85Mn^2 +$$

$$+ 37,14Mn + 149,65$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,15; 0,14; 0,14$$

$$HB = f(S)$$

$$HB = 195,35S + 140,35$$

$$HB = 2489S^2 - 427S + 178,8 \quad (11)$$

$$HB = -63801S^3 + 33488S^2 +$$

$$+ 3277,8S + 290$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,23; 0,22; 0,25$$

$$HB = f(C + Si)$$

$$HB = -20,29(C + Si) + 279,96$$

$$HB = 2,28(C + Si)^2 - \\ - 46,35(C + Si) + 354 \quad (12)$$

$$HB = 0,49(C + Si)^3 + 10,98(C + Si)^2 -$$

$$- 97,3(C + Si) + 453$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,27; 0,25; 0,25$$

$$HB = f(C_E)$$

$$HB = -45,31C_E + 363,18$$

$$HB = 33,98C_E^2 - 337,89C_E + \\ + 983,37 \quad (13)$$

$$HB = -3,32C_E^3 - 17,89C_E^2 -$$

$$- 67,78C_E + 550$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,31; 0,28; 0,28$$

$$HB = -54,73S_E + 245,14$$

$$HB = f(S_E) \quad \begin{aligned} HB &= 1098S_E^2 - 1589S_E + 789,28 \\ HB &= -105,48S_E^3 - 1315,7S_E^2 - \\ &- 1825S_E + 833 \end{aligned} \quad (14)$$

$$HB = -105,48S_E^3 - 1315,7S_E^2 -$$

$$- 1825S_E + 833$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,16; 0,14; 0,13$$

$$\sigma_b = 0,104HB - 4,37$$

$$\sigma_b = f(HB) \quad \begin{aligned} \sigma_b &= 0,0006HB^2 - 0,073HB + 11,15 \\ \sigma_b &= 0,000043HB^3 + 0,00275HB^2 - \\ &- 0,398HB + 21,43 \end{aligned} \quad (15)$$

$$- 0,398HB + 21,43$$

коефіцієнти кореляції

$$r = 0,75; 0,75; 0,76$$

Аналізуючи рівняння регресії (1–15), встановлено, що коефіцієнти кореляції і кореляційні відношення відрізняються один від одного несуттєво. Майже всі розраховані коефіцієнти кореляції статистично значимі.

Збільшення вмісту вуглецю і кремнію знижує міцність і твердість сірого чавуну, а сумарний вміст вуглецю і кремнію суттєво знижує міцність і твердість сірого чавуну.

Зі збільшенням вмісту марганцю і сірки в чавуні спостерігається збільшення його міцності і твердості. Але вплив сірки суттєвіший, ніж марганцю, це підтверджується більш високими коефіцієнтами кореляції.

З аналізу рівнянь регресії також видно, що зі збільшенням вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності міцність і твердість сірого чавуну знижується, а коефіцієнти кореляції значимі.

Виходячи із аналізу рівнянь регресії видно, що залежність між міцністю і твердістю сірого чавуну  $\sigma_b = f(HB)$  характеризується високою тісністю зв'язку, оскільки коефіцієнт кореляції дорівнює  $r = 0,75$ .

### Висновки

1. На механічні властивості сірого чавуну вуглець має найбільш суттєвий вплив, ніж кремній. Також значний вплив має сумарний вміст вуглецю і кремнію та вуглецевий еквівалент. Вплив ступеня евтектичності менш значний. Сірка впливає більш суттєво, ніж марганець.

2. Запропоновано відповідно оптимальний хімічний склад сірого чавуну для дослідження механічних властивостей та отримані рівняння регресій залежностей механічних властивостей сірого чавуну від хімічного складу.

**Список літератури:**

1. Скобло Т.С., Сідашенко О.І., Сайчук О.В. Корпусні деталі з чавунів та їх якісні показники: монографія. Х: Діса плюс, 2019. 282 с.
2. Сіренко К.А. Удосконалена технологія коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційно-тигельних печах. *Процеси лиття*. 2022. № 1(147). С. 3–10.
3. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну. *Процеси лиття*. 2021. № 4(146). С. 66–75.
4. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві. *Процеси лиття*. 2023. № 1(151). С. 20–34.
5. Бахрушин В.С. Методи аналізу даних: навч. посіб. Запоріжжя: КПУ, 2011. 268 с.
6. Василенко О.А., Сенга І.А. Математично-статистичні методи аналізу у прикладних дослідженнях: навч. посіб. Одеса: ОНАО ім. О.С. Попова, 2011. 166 с.
7. Босий М.В., Шевченко Б.П., Герасименко І.О., Ботнарченко 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.
8. Назаренко Н. Можливості математичного пакету MATHCAD. Збірник тез II Української конференції молодих науковців. Київ. 2015. С. 181–183.
9. Національний стандарт України. ДСТУ8833. Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальнотехнічні умови. 2019. С. 7.

**Bosyi M.V., Kropivnyi V.M., Kuzyk O.V., Kropivna A.V. ON THE STUDY OF THE INFLUENCE OF THE CHEMICAL COMPOSITION ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF GRAY IRON**

*The use of gray iron castings in the machine-building industry makes it possible to increase the wear resistance and operational properties of machine structures and parts, which in turn, also increases their reliability for the machine-building industry. At present, interest in the problems of cast iron, that is, the formation of structure and mechanical properties, has grown significantly. An important indicator of the quality of gray cast iron is its mechanical properties, which depend on its chemical composition and structure and certain technological processes. The article examines the influence of the chemical composition of gray cast iron on its structure and mechanical properties. Research was carried out using the methods of mathematical statistics, that is, the method of least squares and correlation analysis in Microsoft Office Excel and MathCAD. The regression equations of the dependences of the mechanical properties of gray cast iron on its chemical composition were obtained, while the closeness of the connection between the studied parameters was established, and the nature of the effect of carbon, silicon, manganese, sulfur on the mechanical properties of gray cast iron was established, as well as the optimal composition of cast iron was established. It is shown that the total content of carbon and silicon has a significant effect on the mechanical properties, this allows 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. On the basis of the conducted research, in order to improve the mechanical properties of gray cast iron, it is proposed to adopt the following criterion for evaluating the chemical composition of cast iron: carbon equivalent; total carbon and silicon content; manganese and sulfur content separately. To obtain gray cast iron with increased mechanical properties, the carbon equivalent should be in the range of 3.6–4.2%, which corresponds to the carbon content of 3.1–3.75%, silicon 1.9–2.5%, the manganese content should be in interval 0.45–0.75%, and sulfur 0.04–0.14% according to DSTU8833.*

**Key words:** gray cast iron, chemical composition, mechanical properties, regression equation, correlation, method of least squares.