

**Національна академія наук України  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів**

**Національна академія наук України  
Фізико-технологічний інститут металів та сплавів**

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**СІРЕНКО КАТЕРИНА АДОЛЬФІВНА**

УДК 621.745.55:669.162.6

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**КОНТРОЛЬ І РЕГУЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ,  
ПРОГНОЗУВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ СІРОГО ЧАВУНУ В ПРОЦЕСІ  
ЙОГО ПЛАВКИ ТА ЛИТТЯ**

05.16.04 – Ливарне виробництво  
Спеціальність:

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



\_\_\_\_\_ К.А. Сіренко

Науковий керівник: **Жуков Леонід Федорович**, доктор технічних наук

КИЇВ – 2024

## **АНОТАЦІЯ**

### **Сіренко К.А. Контроль і регулювання хімічного складу, прогнозування властивостей сірого чавуну в процесі його плавки та лиття.–**

Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук зі спеціальності 05.16.04 – Ливарне виробництво. Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України. Київ, 2024.

В дисертаційній роботі обґрунтовано та розвинуто науково-методологічні засади і пропозиції з подальшого удосконалення контролю і регулювання хімічного складу сірого чавуну в процесі його плавки та лиття. Представлено результати досліджень хімічного складу, механічних властивостей, експлуатаційних характеристик синтетичного чавуну, виплавленого в індукційних тигельних печах і призначеного для виготовлення ливарних виробів. Встановлено параметри розподілу вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$ , вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності в чавуні промислових партій виробів, що виготовляють згідно з ГОСТ 30249-97, ГОСТ 34503-2018, ДСТУ 8833:2019.

Результати досліджень хімічного складу чавунних виробів промислових партій засвідчили, що видалення із первинної заводської інформації сумнівних значень показників не змінює загальних висновків. Середні значення вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  залишаються майже незмінними. Діапазони розташування значень вмісту цих елементів у складі чавуну після уточнення первинних даних скориговуються на  $\sim (0,1...0,2)$  %. Фактором, найбільш дестабілізуючим хімічний склад і механічні властивості синтетичного чавуну та виробів з нього, є непостійність вмісту хімічних елементів у металобрухті, який служить шихтою для виплавлення чавуну.

Результатами виконаних досліджень і узагальненням виробничого досвіду ливарних підприємств показано, що обладнання і технологія виплавлення сірого синтетичного чавуну в тигельних індукційних печах

забезпечує отримання чавуну з вмістом сірки в межах 0,02...0,04 % за відсутності домішок небажаних хімічних елементів. Рекомендовано в зазначених вище стандартах на сірий чавун зменшити вміст сірки до 0,05%.

Встановлено, що твердість і міцність на злам чавунних гальмівних (гальмових) колодок не корелюють з вмістом хімічних елементів у чавуні, а діапазони розподілу вмісту елементів суттєво вузьчі, ніж допустимі границі їх вмісту в стандартах і технічних умовах. Коефіцієнти варіації вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  не перевищують 0,21, твердості та міцності на злам – ще менше. Твердість і міцність на злам ливарних виробів не залежить від величини вуглецевого еквівалента чавуну при порівняно вузькому діапазоні його розподілу в умовах промислового виробництва гальмових колодок згідно з ГОСТ 30249-97. Коефіцієнти варіації твердості НВ гальмових колодок з чавуну складали 0,084 і 0,073, відповідно до первісних заводських даних різних партій цієї ливарної продукції та 0,082 і 0,069 після видалення помилок з масивів вибірок.

Представлено результати досліджень величини вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності і відношення  $C/Si$  хімічного складу синтетичного сірого чавуну, який використовують для виготовлення ливарних виробів відповідального призначення за ГОСТ 30249-97, ГОСТ 34503-2018, ДСТУ 8833:2019. Наведено і проаналізовано приклади різних підходів і формул для визначення меж і способів використання вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну для характеристики зварюваності сталей, коефіцієнта тертя, зносу, інших властивостей чавунних виробів, оцінки якості чавунного литва в цілому. Показано, що в межах регламентованих зазначеними вище стандартами діапазонів вмісту хімічних елементів у складі чавуну значення його вуглецевого еквівалента в окремих плавках-партіях виробів можуть суттєво (на 30 %) різнитися. При певних співвідношеннях основних елементів у хімічному складі чавуну величини вуглецевого еквівалента можуть бути однаковими, але механізми кристалізації чавуну і його властивості не співпадати. Встановлено, що технологія виплавлення в індукційних тигельних печах сірого чавуну в основному забезпечує необхідну стабільність вмісту

хімічних елементів у його складі і стабільність механічних властивостей при порівняно незначних коливаннях хімічного складу металобрухту, феросплавів, температурних режимів плавки. Показано, що при виплавленні в індукційних тигельних печах сірого синтетичного чавуну, призначеного для виготовлення ливарних виробів згідно з вищезазначеними стандартами, діапазони варіювання вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  значно вужчі, ніж регламентовані стандартами на цю ливарну продукцію. Відмічена принципова можливість і надані рекомендації щодо внесення відповідних уточнень до вимог стандартів відносно вмісту хімічних елементів у синтетичному сірому чавуні, призначеному для виготовлення ливарних виробів згідно з ГОСТ 30249-97, ГОСТ 34503-2018, ДСТУ 8833:2019.

Встановлено діапазони розподілу вмісту хімічних елементів у складі синтетичного чавуну промислових партій гальмових колодок і «клин» Ханіна», призначених для рухомого складу залізниці. На прикладі зазначеної продукції показано, що вміст хімічних елементів у сірому синтетичному ливарному чавуні промислових партій та розраховані на цій інформаційній базі вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, відношення  $C/Si$ , інші показники, що прямо чи опосередковано характеризують формування структури, технологічні (ливарні), механічні, експлуатаційні властивості виробів з чавуну необхідно розглядати як випадкові величини у ймовірнісному аспекті. Відповідно регулювання хімічного складу чавуну в процесі плавки слід здійснювати з огляду на такий підхід. Досліджено можливість посилення ефективності регулювання хімічного складу ливарного чавуну шляхом врахування нестабільності компонентів шихти, призначеної для виплавлення його в індукційних тигельних печах.

Сформульовано методологію і алгоритм моделювання процедури корекції вмісту хімічних елементів у розплаві металу безпосередньо в процесі плавки, засновані на врахуванні ймовірнісних оцінок нестабільності складу феросплавів та інших матеріалів, які використовують при коригуванні хімічного складу чавуну. Для ймовірнісних оцінок нестабільності

властивостей модифікаторів, які використовують для регулювання складу чавуну, застосовано метод Монте-Карло. Розроблені рішення щодо удосконалення моделювання процедури коригування хімічного складу чавуну при його виплавленні, які передбачають оцінку і врахування вагомості вмісту кожного хімічного елемента у чавуні. Запропоновано підходи до визначення «домінуючого елемента» та «точок прицілювання» при моделюванні процедури коригування хімічного складу чавуну в процесі плавки, виходячи із принципу забезпечення вмісту хімічних елементів поблизу верхньої або нижньої границь діапазонів, регламентованих стандартами на ливарні вироби.

Систематизовано теоретичні положення, узагальнено основні підходи щодо розвитку методів, способів та систем коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі його виплавлення в індукційних тигельних печах і виготовлення ливарних виробів відповідального призначення. Виявлено недоліки відомих методів, систем контролю та регулювання хімічного складу ливарного чавуну, який виплавляють в індукційних тигельних печах.

Розроблено комплекс поглядів, уявлень, ідей, спрямованих на розвиток методології регулювання хімічного складу синтетичного ливарного чавуну безпосередньо в процесі плавки. Удосконалена методика моделювання контролю і регулювання хімічного складу чавуну при його виплавленні.

Розроблено алгоритм визначення необхідної кількості легувального матеріалу для внесення у розплав при коригуванні вмісту конкретного хімічного елемента в складі чавуну. Рекомендовано раціональну послідовність прийняття рішень у процедурі розрахунків кількості легуючого матеріалу, необхідного для додавання у розплав.

Розроблено комп'ютерну програму для реалізації зазначених методології і алгоритму, який у процесі свого розвитку передбачає виконання додаткових вимог щодо розташування гістограми вмісту конкретного хімічного елемента поблизу верхньої або нижньої меж його діапазону, регламентованого в стандарті на продукцію, що виробляється.

Передбачає також можливість врахування угару і ступеню засвоєння легуючих хімічних елементів у розплаві в залежності від його температури і тривалості витримки. Ведучі (домінуючі) хімічні елементи потребують першочергової корекції при наявності відхилень їх вмісту відносно стандартизованих нормативів. Обмеження в коригуванні хімічного складу чавуну, призначеного для виготовлення будь-яких виробів, полягають у тому, що мікроструктура, твердість і міцність на злам, фрикційні властивості (коефіцієнт тертя, зносостійкість) мають відповідати вимогам стандартів і умовам експлуатації цих виробів при будь-якому хімічному складі в межах дозволеного вмісту окремих елементів.

Наведено результати дослідження розподілу хімічних елементів у складі феромарганцю і феросиліцію, які використовують в шихті при виплавленні сірого синтетичного чавуну. Запропоновано при виплавленні чавуну, призначеного для виготовлення зазначених ливарних виробів, надавати найбільші коефіцієнти вагомості кремнію і марганцю. Рекомендовано прогнозувати ступінь угару елементів у процесі моделювання плавки чавуну і враховувати цей прогноз ще на стадії формування шихти. Визначено орієнтовний склад шихти для виплавлення синтетичного чавуну відповідного призначення і порядок завантаження шихтових матеріалів в індукційні тигельні печі.

Вдосконалено метод термічного деривативного експрес-аналізу рідких чавунів, який ґрунтується на розпізнаванні геометричної схожості кривих, що досліджуються, і референсних кривих охолодження з електронної бази даних. Ідентичність кривих виявляється автоматично за допомогою спеціальних алгоритмів і комп'ютерних програм. Метод забезпечує швидке та достовірне оцінювання якості рідкого чавуну на основі інформації про заздалегідь встановлені показники властивостей чавунів, відображених на референсних кривих, за умови, що криві охолодження, які досліджуються, співпадають з референсними або їм подібні. Критерій схожості кривих, що порівнюються, – мінімальна різниця температур на ділянці евтектичного твердіння.

Розроблено алгоритми та програми математичної обробки результатів дослідження термічних кривих охолодження залізовуглецевих сплавів. Визначено, що алгоритм методу є універсальним та придатним для експрес-аналізу кількісних показників якості рідких ливарних сплавів. Зокрема, метод дозволяє визначити за допомогою референсних кривих, що накопичені у електронній базі даних заздалегідь, не тільки хімічний склад основних елементів, але і весь комплекс будь-яких домішок, що містяться у розплаві, а також отримувати інформацію про мікроструктуру та механічні властивості дослідного зразка металу.

Уточнено базову формулу розрахунку універсального критерію розпізнавання форми кривих охолодження. Розроблено нову універсальну формулу розрахунку критерію подібності (розпізнавання) форми термічних кривих охолодження рідких чавунів. Підвищено точність результату вимірювання та кількісної оцінки розкиду величини критерію (показника) подібності форми термічних кривих охолодження завдяки введенню статистичної характеристики – двостороннього довірчого інтервалу. Запропоновано враховувати в термічному аналізі кривих охолодження чавуну вагомість впливу температури на його властивості на кожному відрізку і навіть в кожній точці кривих охолодження. Показано, що введення відповідного коефіцієнта впливу дозволяє оцінювати вагомість будь-якого температурного інтервалу кристалізації чавуну на його властивості, а також виключати з аналізу період первинної кристалізації чавуну.

На рівні винаходів розроблено нові способи термічного деривативного експрес-аналізу якості рідкого чавуну із використанням референсних кривих охолодження та застосуванням пробовідбірників занурення нової конструкції. Забезпечено суттєве підвищення точності і посилення достовірності визначення температури розплавленого чавуну при проведенні термічного деривативного експрес-аналізу.

Розроблено новий спосіб термічного аналізу рідкого чавуну, який враховує нерівнозначність впливу різних температурних діапазонів

охолодження рідкого чавуну на його властивості шляхом введення в розрахункову формулу відповідного коефіцієнта.

Розроблено, апробовано та передано до використання в режимі радника персоналу ливарних заводів методологію коригування хімічних елементів у складі розплаву сірого чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах. Розроблено типову технологічну інструкцію (методологічні рекомендації) щодо застосування системи контролю і корекції хімічного складу чавуну в процесі виплавлення в індукційних тигельних печах.

Показано, що головні цілі й завдання на нинішньому етапі розвитку ливарного виробництва в частині удосконалення технології, порядку, процедури, алгоритму регулювання хімічного складу синтетичного чавуну при його виплавленні полягають у зменшенні собівартості литва, зокрема й за рахунок впровадження на практиці методів коригування вмісту хімічних елементів у розплаві чавуну та врахування у ймовірнісному аспекті нестабільності якості компонентів шихти, насамперед феросплавів і металобрухту.

**Ключові слова:** ливарне виробництво, синтетичний чавун, технологія, плавка, хімічний склад, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, властивості, моделювання процесу, термічний аналіз.

### ***ABSTRACT***

*Sirenko K.A.* Control and regulation of the chemical composition, prediction of the properties of gray iron in the process of its melting and casting. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for the degree of a candidate of technical sciences (doctor of philosophy (Ph.D.)) by specialty 05.16.04 - Foundry production. The Physico - technological institute of metals and alloys, National Academy Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

In the dissertation, the scientific and methodological principles and proposals for further improvement of the control and regulation of the chemical composition



of gray iron in the process of its melting and casting are substantiated and developed. The results of research into the chemical composition, mechanical properties, and operational characteristics of synthetic cast iron smelted in induction crucible furnaces and intended for the production of cast products are presented. The distribution parameters of the content of C, Si, Mn, P, S, carbon equivalent and the degree of eutecticity in cast iron of industrial batches of products manufactured in accordance with GOST 30249-97, GOST 34503-2018, DSTU 8833:2019 were established.

The results of research into the chemical composition of cast iron products of industrial batches proved that the removal of questionable indicator values from primary factory information does not change the general conclusions. The average values of the content of C, Si, Mn, P, S remain almost unchanged. The ranges of the values of the content of these elements in the composition of cast iron are adjusted by  $\sim (0.1...0.2) \%$  after refining the primary data. The factor that most destabilizes the chemical composition and mechanical properties of synthetic cast iron and products made from it is the instability of the content of chemical elements in scrap metal, which serves as a charge for smelting cast iron.

The results of the performed research and the generalization of the production experience of foundry enterprises show that the equipment and technology of smelting gray synthetic iron in crucible induction furnaces ensures the production of iron with a sulfur content of  $0.02...0.04\%$  in the absence of impurities of unwanted chemical elements. It is recommended in the above standards for gray cast iron to reduce the sulfur content to  $0.05\%$ .

It was established that the hardness and breaking strength of cast iron brake pads do not correlate with the content of chemical elements in cast iron, and the distribution ranges of the content of elements are significantly narrower than the permissible limits of their content in standards and technical conditions. The coefficients of variation in the content of C, Si, Mn, P, S do not exceed 0.21, hardness and fracture toughness are even less. The hardness and fracture toughness of cast products does not depend on the carbon equivalent of cast iron with a

relatively narrow range of its distribution in the conditions of industrial production of brake pads according to GOST 30249-97. The coefficients of variation of the hardness of HB brake pads made of cast iron were 0.084 and 0.073, according to the original factory data of different batches of these casting products, and 0.082 and 0.069 after removing errors from the arrays of samples.

The results of studies of the value of the carbon equivalent, the degree of eutecticity and the C/Si ratio of the chemical composition of synthetic gray cast iron, which is used for the manufacture of cast products for responsible purposes according to GOST 30249-97, GOST 34503-2018, DSTU 8833:2019, are presented. Examples of different approaches and formulas for determining the limits and methods of using the carbon equivalent of the chemical composition of cast iron to characterize the weldability of steels, coefficient of friction, wear, other properties of cast iron products, and assessment of the quality of cast iron as a whole are given and analyzed. It is shown that within the limits of the content ranges of chemical elements in cast iron regulated by the above-mentioned standards, the values of its carbon equivalent in individual smelting batches of products can differ significantly (by 30%). With certain ratios of the main elements in the chemical composition of cast iron, the values of the carbon equivalent can be the same, but the mechanisms of crystallization of cast iron and its properties do not coincide. It has been established that the technology of smelting gray iron in induction crucible furnaces mainly ensures the necessary stability of the content of chemical elements in its composition and the stability of mechanical properties with relatively minor fluctuations in the chemical composition of scrap metal, ferroalloys, and melting temperature regimes. It is shown that when smelting in induction crucible furnaces gray synthetic iron intended for the production of foundry products according to the above-mentioned standards, the ranges of variation in the content of C, Si, Mn, P, S are much narrower than those regulated by the standards for these foundry products. A fundamental possibility was noted and recommendations were made regarding the introduction of relevant clarifications to the requirements of the standards regarding the content of chemical elements in synthetic gray cast iron intended for the

production of cast products in accordance with GOST 30249-97, GOST 34503-2018, DSTU 8833:2019.

The distribution ranges of the content of chemical elements in the composition of synthetic cast iron of industrial batches of brake pads and "Khanin's wedge" intended for railway rolling stock have been established. On the example of the specified products, it is shown that the content of chemical elements in gray synthetic cast iron of industrial batches and the carbon equivalent, the degree of eutecticity, the C/Si ratio, other indicators that directly or indirectly characterize the formation of the structure, technological (foundry), mechanical, operational properties of cast iron products must be considered as random variables in a probabilistic aspect. Accordingly, regulation of the chemical composition of cast iron in the smelting process should be carried out with this approach in mind. The possibility of increasing the effectiveness of regulating the chemical composition of cast iron by taking into account the instability of the components of the charge intended for its smelting in induction crucible furnaces was studied.

The methodology and algorithm for modeling the procedure for correcting the content of chemical elements in the molten metal directly in the melting process are formulated, based on taking into account probabilistic estimates of the instability of the composition of ferroalloys and other materials used in the correction of the chemical composition of cast iron. The Monte Carlo method is used for probabilistic estimates of the instability of the properties of the modifiers used to adjust the cast iron composition. Solutions have been developed to improve modeling of the procedure for adjusting the chemical composition of cast iron during its smelting, which provide for the assessment and consideration of the weight of the content of each chemical element in cast iron. Approaches to determining the "dominant element" and "aiming points" are proposed when modeling the procedure for adjusting the chemical composition of cast iron in the smelting process, based on the principle of ensuring the content of chemical elements near the upper or lower limits of the ranges regulated by the standards for foundry products.

The theoretical provisions are systematized, the main approaches to the development of methods, methods and systems for adjusting the chemical composition of synthetic iron in the process of its smelting in induction crucible furnaces and the production of cast products of responsible purpose are summarized. The shortcomings of known methods, systems of control and regulation of the chemical composition of cast iron, which is smelted in induction crucible furnaces, were revealed.

A complex of views, ideas, and ideas aimed at the development of the methodology for regulating the chemical composition of synthetic cast iron directly in the melting process has been developed. An improved method of modeling control and regulation of the chemical composition of cast iron during its smelting.

An algorithm was developed to determine the required amount of alloying material to be added to the melt when adjusting the content of a specific chemical element in the composition of cast iron. A rational sequence of decision-making in the procedure of calculating the amount of alloying material required for addition to the melt is recommended.

A computer program has been developed for the implementation of the mentioned methodology and algorithm, which in the course of its development involves the fulfillment of additional requirements regarding the location of the histogram of the content of a specific chemical element near the upper or lower limits of its range, regulated in the standard for manufactured products. It also provides for the possibility of taking into account the soot and the degree of assimilation of alloying chemical elements in the melt, depending on its temperature and duration of exposure. Leading (dominant) chemical elements require priority correction in the presence of deviations in their content relative to standardized standards. Limitations in adjusting the chemical composition of cast iron intended for the manufacture of any products are that the microstructure, hardness and fracture toughness, frictional properties (friction coefficient, wear resistance) must meet the requirements of the standards and conditions of operation of these products

under any chemical composition within the permitted content of individual elements.

The results of a study of the distribution of chemical elements in the composition of ferromanganese and ferrosilicon, which are used in the charge when smelting gray synthetic iron, are given. It is proposed to provide the highest coefficients of gravity of silicon and manganese when smelting iron intended for the production of the specified foundry products. It is recommended to forecast the degree of soot of elements in the process of modeling cast iron melting and to take this forecast into account even at the stage of charge formation. The approximate composition of the charge for smelting synthetic cast iron of the appropriate purpose and the procedure for loading the charge materials into induction crucible furnaces have been determined.

The method of thermal derivative express analysis of liquid cast irons has been improved, which is based on the recognition of the geometric similarity of the investigated curves and reference cooling curves from the electronic database. The identity of the curves is detected automatically using special algorithms and computer programs. The method provides a quick and reliable assessment of the quality of liquid cast iron based on information about predetermined indicators of the properties of cast iron shown on the reference curves, provided that the cooling curves under investigation coincide with the reference ones or are similar to them. The criterion for the similarity of the curves being compared is the minimum temperature difference in the area of eutectic hardening.

Algorithms and programs for mathematical processing of the results of research on thermal curves of cooling of iron-carbon alloys have been developed. It was determined that the algorithm of the method is universal and suitable for express analysis of quantitative indicators of the quality of liquid foundry alloys. In particular, the method makes it possible to determine not only the chemical composition of the main elements, but also the entire complex of any impurities contained in the melt with the help of reference curves stored in the electronic

database in advance, as well as to obtain information about the microstructure and mechanical properties of the test sample metal

The basic formula for calculating the universal criterion for recognizing the shape of cooling curves has been clarified. A new universal formula for calculating the criterion of similarity (recognition) of the shape of the thermal curves of cooling liquid cast irons has been developed. The accuracy of the measurement result and quantitative assessment of the spread of the criterion (indicator) of the similarity of the shape of the thermal cooling curves has been increased thanks to the introduction of a statistical characteristic - a two-sided confidence interval. It is proposed to take into account in the thermal analysis of the cooling curves of cast iron the importance of the influence of temperature on its properties at each segment and even at each point of the cooling curves. It is shown that the introduction of the appropriate coefficient of influence makes it possible to evaluate the importance of any temperature interval of cast iron crystallization on its properties, as well as to exclude the period of primary cast iron crystallization from the analysis.

At the level of inventions, new methods of thermal derivative express analysis of the quality of liquid cast iron have been developed using reference cooling curves and the use of immersion samplers of a new design. A significant increase in the accuracy and reliability of the determination of the temperature of molten cast iron during the thermal derivative express analysis has been ensured.

A new method of thermal analysis of liquid cast iron has been developed, which takes into account the unequal influence of different temperature ranges of cooling of liquid cast iron on its properties by entering the appropriate coefficient into the calculation formula.

A methodology for adjusting chemical elements in the composition of gray iron melt during melting in induction crucible furnaces was developed, tested and transferred for use as an advisor to the personnel of foundries. A typical technological instruction (methodological recommendations) has been developed regarding the use of a control system and correction of the chemical composition of cast iron in the process of smelting in induction crucible furnaces.

It is shown that the main goals and objectives at the current stage of the development of foundry production in terms of improving the technology, order, procedure, algorithm for regulating the chemical composition of synthetic iron during its smelting are to reduce the cost of casting, in particular, due to the implementation in practice of methods of adjusting the content of chemical elements in cast iron melts and taking into account in the probabilistic aspect the instability of the quality of the components of the charge, primarily ferroalloys and scrap metal.

**Key words:** foundry production, synthetic cast iron, technology, smelting, chemical composition, carbon equivalent, eutectic degree, properties, process modeling, thermal analysis.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації.**

*Статті у виданнях категорії А та у закордонних виданнях, які входять до наукометричних баз Web of Science Core Collection та/або Scopus:*

1. Zacharcenko E.V. Ladle and In-Mold Modification Methods For Obtaining Castings From Cast Irons With Various Graphite Morphology / E.V. Zacharcenko, O.I. Shinsky, G.A. Baglyuk, S.I. Klimenko, V.Y. Kurovsky, **E.A. Sirenko**, A.L. Gonharov // ISSN 1815-2066. Nauka innov. – 2019. – №15 (1), – pp. 53–62. (Scopus) DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.01.053>.

2. Zakharchenko E.V. New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality of Melts and Castings / E. Zakharchenko, **E. Sirenko**, A. Goncharov, A. Bogdan, A. Burbelko, M. Kawalec // Journal of Casting and Materials Engineering. – 2019. – Vol. 3. No. 2. – pp. 31–42. (Web of science)

DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.31>.

**Статті у фахових виданнях України:**

3. Жуков Л.Ф. Инновационные технологии экспрессного контроля температуры и химического состава железоуглеродистых сплавов / Л.Ф.

Жуков, А.Л. Гончаров, Д.А. Петренко, Э.В. Захарченко, **Е.А. Сиренко** // Металл и литье Украины. – 2018. – № 11–12 (306–307). – С. 43–53.

4. Захарченко Э.В. Новый метод компьютерного термического экспресс-анализа качества жидких чугунов с предсказанием микроструктуры и свойств отливок при комнатных температурах / Э.В. Захарченко, А.А. Бурбелко, **Е.А. Сиренко**, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан, М. Кавалец // Процеси лиття. – 2019. – № 3. – С. 46–58.

5. **Сиренко К.А.** Удосконалення нормативно-технічної документації на ливарні вироби з чавуну // Процеси лиття. – 2021. – № 3 (145). – С. 69–76.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2021>

6. **Сиренко К.А.**, Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну // Процеси лиття. – 2021. – № 4 (146). – С. 66–75.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003>

7. **Сиренко К.А.**, Мазур В.Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва // Метал та лиття України. – 2021. – Т. 29. – № 4 (327). – С. 44–54.

DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.00>

8. **Сиренко Е.А.** Особенности литейного чугуна для тормозных колодок железнодорожного транспорта // Литье и металлургия. – 2022. – № 1. – С. 43–48. DOI: <https://doi.org/1021122/1683-6065-2022-1-43-48>

9. **Сиренко К.А.** Коефіцієнти тертя між колесами залізничного транспорту і гальмовими колодками з чавуну та композиційного матеріалу: порівняльний аналіз // Метал та лиття України. – 2022. – Т. 30. – № 1 (328). – С. 91–100. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.09>

10. **Сиренко К.А.** Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах // Процеси лиття. – 2022. – № 1 (147). – С. 3–10.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003>



11. **Сіренко К.А.** Розвиток методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах // Метал та лиття України. – 2022. – Т. 30. – № 2 (329). – С. 30–39.

DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>

12. **Сіренко К.А.** Шляхи удосконалення методики термічного аналізу якості рідкого чавуну // Процеси лиття. – 2022. – № 2 (148 ). – С. 50–55.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.02.04>

13. Мазур В.Л., **Сіренко К.А.** Економічні та екологічні аспекти використання гальмових колодок з чавуну чи композиційного матеріалу для залізничного транспорту // Процеси лиття. – 2022. – Том 149. – № 3. – С. 52–62. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.03.05>

14. **Сіренко К.А.** Характеристика твердості чавунних гальмових колодок залізничного транспорту. // Метал та лиття України. – 2022. – Т. 30. – № 3 (330). – С. 96–101.

DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096>.

15. Мазур В.Л., **Сіренко К.А.** Аналіз тенденцій виробництва литва з синтетичного чавуну (на прикладі порівняння гальмових колодок для рухомого складу залізниці, виготовлених з різних матеріалів) // Теорія і практика металургії. – 2022. – № 3. – С. 5–14. [https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_03\\_2022\\_site.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_03_2022_site.pdf)

16. **Сіренко К.А.**, Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві // Процеси лиття. – 2023. – №1 (151). – С. 20–34. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020>

17. Мазур В. Л., **Сіренко К.А.** Механізм тертя гальмівних колодок з чавуну та композиційного матеріалу по поверхні коліс залізничного транспорту // Науково-технічний журнал «Металознавство та обробка металів». – 2023. – Т. 29. – № 1. – С. 18–33. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2023.01.018>

18. Мазур В.Л. Задачі ливарних підприємств у відновленні інфраструктури України / В.Л. Мазур, Попов Є.С., Клименко С.І., **Сіренко**

**К.А.** // Метал та лиття України. – 2023. – № 1 (332). – С. 64–69. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.01.06>

19. **Сіренко К.А.**, Мазур В.Л. Оцінка підходів до прогнозування властивостей синтетичного чавуну у ливарному виробництві // Науково-технічних журнал «Металознавство та обробка металів». – 2023. – Т. 29. – № 2. – С. 24–35. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.023>

20. **Сіренко К.А.**, Мазур В.Л., Дереча Д.О. Залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності // Метал та лиття України. – 2023. – Т. 31. – № 2 (333). – С. 42–50. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042>

21. **Сіренко К. А.**, Мазур В.Л. Прогнозування механічних властивостей сірого чавуну (ймовірнісний підхід) // Науково-технічних журнал «Металознавство та обробка металів». – 2023. – Т. 29. – № 3. – С. 19–30. DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019>

22. **Сіренко К.А.**, Мазур В.Л. Переваги та недоліки методів розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну в ливарному виробництві // Процеси лиття. – 2023. – № 3 (153). – С. 49–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.049>

23. Мазур В.Л., **Сіренко К.А.** Проблемні питання стандартизації ливарної продукції (на прикладі стандартизації гальмових колодок залізничного транспорту) // Метал та лиття України. – 2023. – Vol. 31. – № 3 (334). – С. 39–48. DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.039>

24. **Сіренко К.А.**, Дереча Д.О., Мазур В.Л. Застосування методу Монте-Карло в розрахунках шихти й регулюванні хімічного складу чавуну в процесі його виплавлення // Процеси лиття. – 2023. – № 4 (154). – С. 44–57. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.04.044>

#### ***Патент на корисну модель:***

25. Патент України на корисну модель № 99968. Способ термического анализа жидкого чугуна / Э.В. Захарченко, **Е.А. Сиренко**, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан. Оpub. 25.06.2015. – Бюл. № 12.

### ***Патент на винахід:***

26. Патент України на винахід № 113333. Спосіб термічного аналізу рідкого чавуну / Э.В. Захарченко, **Е.А. Сиренко**, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан. Опуб. 10.01.2017. – Бюл. № 1.

### ***Свідоцтво про авторське право на твір:***

27. Смульська К.А. (**Сиренко К.А.**), Варава І.А. Комп'ютерна програма «TermoExp» / Свідоцтво про авторське право на твір. – № 17697 – 21.08.2006.

### **Праці, які засвідчують апробацію основних матеріалів дисертації**

28. Жуков Л.Ф., **Сиренко Е.А.**, Школяренко В.П. Термографический регрессионный экспресс-контроль  $C$  и  $Si$  в чугунах // XI Международная научно-практическая конференция «Литье. Металлургия-2015» в рамках XIII Международной специализированной выставки «Машиностроение. Металлургия. 2015» и XI Международной специализированной выставки «Литье-2015». – Запорожье, 2015. – С. 90–91.

URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/30301>

29. Захарченко Э.В. Новый компьютерный метод термического экспресс-анализа качества жидких чугунов для предсказания микроструктуры и свойств отливок с использованием референсных кривых охлаждения / Э.В. Захарченко, А.А. Бурбелко, **Е.А. Сиренко**, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан // XV міжнародна науково-практична конференція «Литво 2019» VIII міжнародна науково-практична конференція «Металургія 2019», Запоріжжя. 21–23 травня 2019. – С. 99–100.

DOI: [10.34708/GSTOU.CONF.2020.94.94.003](https://doi.org/10.34708/GSTOU.CONF.2020.94.94.003)

30. **Сиренко К.А.** Ливарне виробництво: невирішені задачі та перспективи розвитку // «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві». Матеріали VIII науково-технічної конференції. – Краматорськ, 2021. ДДМА. – С. 109–110.

31. **Сиренко К.А.** Перспективні напрями розвитку методики визначення складу шихти при виплавленні чавуну // Збірник тез XIX міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2023», XII міжнародної науково-

практичної конференції «Металургія 2023». – Харків – Київ, 2023 р. – С. 200–202.

32. Мазур В.Л., *Сіренко К.А.* Порівняльний аналіз стандартів на гальмові колодки залізничного транспорту з чавуну та композиційного матеріалу // Збірник тез XIX міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2023», XII міжнародної науково-практичної конференції «Металургія 2023». – Харків – Київ, 2023 р. – С. 132–133.

33. *Сіренко К.А.*, Мазур В.Л. Ймовірнісний підхід до методології регулювання хімічного складу і прогнозування властивостей сірого синтетичного чавуну // International Scientific Conference «MININGMETALTECH – 2023. The mining and metals sector: integration of business, technology and education». – Izdevniecība Publishing. – 2023. – Vol. 1. – С. 116–119.

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-36>

34. *Сіренко К.А.*, Мазур В.Л. Моделювання процедури визначення шихти і коригування складу розплаву чавуну (ймовірнісний підхід із застосуванням методу Монте-Карло) // Збірник тез Всеукраїнської науково-технічної конференції «Наука і металургія». – Дніпро, 2023. С. 85.

DOI: 10.52150/2522-9117-2022-conferens.

## ЗМІСТ

	Стор.
Вступ	24
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМ І МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ СІРОГО СИНТЕТИЧНОГО ЧАВУНУ	31
1.1. Шляхи розвитку теорії і технології ливарного виробництва	31
1.2. Традиційний підхід до контролю і коригування хімічного складу ливарного чавуну при виплавленні його в індукційних тигельних печах	39
1.3. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві	50
1.4. Характеристика твердості чавунних гальмівних колодок залізничного транспорту	54
1.5. Стан розвитку та недоліки відомих методик ТДА хімічного складу і властивостей чавуну	61
Висновки до розділу 1	67
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ У ЙМОВІРНІСНОМУ ПІДХОДІ ВЕЛИЧИН УЗАГАЛЬНЕНИХ ПОКАЗНИКІВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ І ПРОГНОЗУВАННЯ НА ЇХ ОСНОВІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИЛИВКІВ	68
2.1. Методика врахування в ймовірнісному аспекті нестабільності хімічного складу шихти для виплавлення ливарного чавуну	68
2.2. Методика визначення залежності твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності	75
2.3. Методика прогнозування механічних властивостей і теплопровідності сірого чавуну	86
Висновки до розділу 2	98

РОЗДІЛ 3. ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МЕТОДОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ І КОРИГУВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЛИВАРНОГО ЧАВУНУ ПРИ ВИПЛАВЛЕНІ ЙОГО В ІНДУКЦІЙНИХ ТИГЕЛЬНИХ ПЕЧАХ	100
3.1. Дослідження стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових виробів із синтетичного ливарного чавуну	100
3.2. Алгоритм корекції вмісту елементів у хімічному складі чавуну під час виплавлення за результатами його контролю у відібраній з розплаву пробі металу	138
3.3. Можливості оптимізації процесу регулювання хімічного складу чавуну при його виплавленні	147
3.4. Комп'ютерна програма «Alloyage» моделювання процесу регулювання хімічного складу розплаву чавуну в залежності від типу та хімічного складу модифікаторів	150
Висновки до розділу 3	159
РОЗДІЛ 4. РОЗВИТОК МЕТОДУ ТЕРМІЧНОГО ДЕРИВАТИВНОГО АНАЛІЗУ (ТДА) ЯКОСТІ РІДКОГО СІРОГО ЧАВУНУ	163
4.1. Результати дослідження чавунів як об'єктів експресного термічного контролю	167
4.2. Розробка і вдосконалення основних вузлів та компонентів устаткування для реалізації ТДА	169
4.3. Верифікація способу ТДА для прогнозування якості виливків заданого хімічного складу до заливки ливарних форм	178
Висновки до розділу 4	186
5 ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	188
6 СПИСОК ВИКОРИСТАННИХ ДЖЕРЕЛ	192
7 ДОДАТКИ	213
ДОДАТОК А. Список опублікованих праць здобувача	214
ДОДАТОК Б. Хімічний склад чавуну, твердість HB і міцність на злам	

гальмівних колодок типу «М» промислових партій, вироблених ливарним заводом ТОВ «М-ЛИТ»	218
ДОДАТОК В. Хімічний склад і твердість НВ чавуну СЧ350 промислових партій «клину Ханіна», вироблених ливарним заводом ТОВ «М-ЛИТ»	221
ДОДАТОК Г. Масові частки вмісту (не більше, мас.,%) елементів у хімічному складі феросиліцію ФС65 відповідно до наданих сертифікатів, поставленого ливарному заводу ТОВ «М-ЛИТ» у 2019–2021 роках	224
ДОДАТОК Д. Масові частки вмісту (не більше, мас.,%) елементів у хімічному складі феромарганцю ФМн78 згідно з наданими сертифікатами, поставленого ливарному заводу ТОВ «М-ЛИТ» у 2018–2021 роках	226
ДОДАТОК Е. Креслення металевого пробовідбірника рідкого металу нової конструкції	232
ДОДАТОК Ж. Компоненти діючої лабораторної установки удосконаленого термічного експрес-аналізу якості рідких чавунів	233
ДОДАТОК И. Технічні характеристики модуля WAD-AIK-BUS	230
ДОДАТОК К. Копія титульної сторінки «Типової технологічної інструкції»	232
ДОДАТОК Л. Довідка про використання результатів кандидатської дисертації Сіренко Катерини Адольфівни «Контроль і регулювання хімічного складу, прогнозування властивостей сірого чавуну в процесі його плавки та лиття» в промисловій практиці заводу ТОВ «М-ЛИТ»	233
ДОДАТОК М. Довідка про використання результатів дисертаційної роботи молодшого наукового співробітника Відділу безперервного лиття та деформаційних процесів Сіренко Катерини Адольфівни Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів НАН України	234

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Досвід ливарних підприємств та результати досліджень свідчать, що однією з найважливіших наукових й практичних задач у ливарному виробництві України є розвиток, удосконалення науково-методологічної бази щодо забезпечення необхідних хімічного складу і властивостей сірого синтетичного чавуну у процесах його плавки та лиття. При цьому першочергове завдання полягає у розробленні ефективних сучасних методик формування шихти для виплавлення чавуну, коригування його хімічного складу безпосередньо під час плавки, прогнозування структури і властивостей виливків шляхом термічного деривативного експрес-аналізу розплаву. На сучасному етапі розвитку виробництва актуалізувалася також класична науково-технічна задача: хімічний склад – властивості залізовуглецевих сплавів, зокрема чавуну. Актуальність цієї задачі обумовлена необхідністю оптимізації контролю показників якості ливарної продукції за рахунок посилення надійності їх прогнозування. Виходячи з викладеного і враховуючи очікуване зростання попиту і обсягів виробництва литва, необхідного для відновлення інфраструктури України, зазначену тему слід вважати актуальною.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота є складовою частиною досліджень відділу безперервного лиття та деформаційних процесів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів (ФТІМС) НАН України, які виконувались у 2012–2022 роках. А саме: НДР № 629 «Дослідити та розробити методи та засоби експресного комплексного контролю температури та хімічного складу чавунів та вуглецевих сталей», 2012–2014 роках, номер держреєстрації 0112U001352; конкурсна інноваційна робота № 680 «Розробка та підготовка освоєння промислового виробництва прецизійних брикетованих модифікаторів та застосування лантановмісних лігатур і технології обробки ними розплавів при виробництві виливків з високоміцних чавунів різних класів. Розділ 2. «Технологія модифікування рідкого чавуну в ковшах та ливарних формах з



використанням лантановмісних лігатур для отримання виливків з пластинчастим, вермикулярним або кулястим графітом», 2017 р., номер держреєстрації 0117U002746; проєкт № 51 «Розробка та верифікація ефективності інноваційної системи прогнозування якості чавуну у виливках на основі термічного деривативного експрес-аналізу розплаву» відповідно до Протоколу Угоди про наукове співробітництво між Національною академією України та Польською академією наук, підписаною в Києві 1 червня 1997 р. на 2018–2022 роки; договір № 191 від 02.09.2021 р. на створення та передачу науково-технічної продукції між Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів НАН України і ливарним заводом ТОВ «М-ЛИТ».

**Мета та завдання досліджень.** Метою даної роботи є дослідження впливу хімічного складу на якісні характеристики сірого чавуну для прогнозування властивостей виливків та розроблення алгоритмів, методик та математичних моделей щодо контролю і регулювання хімічного складу сірого синтетичного чавуну на стадіях формування шихти, процесі плавки та лиття..

Для досягнення зазначеної мети необхідно було вирішити такі основні **завдання:**

- проаналізувати відомі підходи і методики розрахунку складу шихти для виплавлення сірого чавуну та регулювання його хімічного складу безпосередньо у процесі плавки;
- дослідити фактичні показники якості (хімічний склад і механічні властивості) сірого чавуну у промислових партіях ливарних виробів;
- проаналізувати відомі методики визначення величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності сірого чавуну, а також формули для розрахунку міцності і твердості виливків з чавуну;
- розробити і реалізувати підходи та методи врахування ймовірнісного характеру формування хімічного складу та властивостей чавуну у процесі виготовлення ливарних виробів;

дослідити кореляційні залежності механічних властивостей виливків з сірог

- о синтетичного чавуну від показників його хімічного складу;
- розробити формули, які дозволяють прогнозувати міцність і твердість виливків із сірого чавуну на основі визначених величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності його хімічного складу;
- розробити методологію, алгоритми, математичні моделі формування складу шихти і коригування хімічного складу розплаву чавуну безпосередньо у процесі плавки в індукційних печах, які будуть враховувати в ймовірнісному аспекті нестабільність хімічних елементів у складі модифікаторів та легувальних матеріалів (феросплавів тощо);
- розробити способи удосконалення методики термічного деривативного аналізу (ТДА) чавуну, для прогнозування якості готових виливків із сірого синтетичного чавуну до заливки ливарних форм та верифікувати її достовірність.

*Об'єкт дослідження.* Технологічний процес виробництва виливків із сірого синтетичного чавуну.

*Предмет дослідження.* Хімічний склад і властивості ливарних виробів із сірого синтетичного чавуну; методики контролю, регулювання і прогнозування якості розплаву чавуну та виробів із нього.

**Методи дослідження.** Основним методом дослідження є системний аналіз теоретичних і експериментальних результатів, технологічних рішень, сформованих баз даних щодо хімічного складу і механічних властивостей виливків із сірого синтетичного чавуну, виплавленого в індукційних тигельних печах. Дослідження виконані із застосуванням сучасних аналітичних та експериментальних методів: фізичного та математичного моделювання, стандартних методик визначення хімічного складу і механічних властивостей чавуну, а також методології коригування хімічного складу розплаву сірого чавуну безпосередньо в процесі його виплавлення, термічний деривативний експрес-аналіз якості сірого чавуну. Обробку експериментальних даних виконували з використанням методів математичної статистики.

### **Наукова новизна одержаних результатів дослідження.**

Вперше розроблено алгоритм моделювання процесу визначення маси компонентів шихти для корекції хімічного складу розплаву із застосуванням методу Монте-Карло. *Відомі методи і алгоритми, призначені для моделювання процедури вибору шихти і регулювання хімічного складу розплаву чавуну чи сталі, в більшості не враховують нестабільність хімічного складу шихтових матеріалів.*

Набуло подальший розвиток математичне моделювання визначення вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію в межах діапазонів вмісту хімічного складу сірого чавуну, шляхом застосування методу Монте-Карло. *Отримані результати дають змогу посилити достовірність прогнозування механічних властивостей виливків з чавуну залежно від узагальнених показників його хімічного складу. Відомі методи розрахунів не враховують діапазони вмісту хімічних елементів у складі чавуну.*

Удосконалено визначення залежності механічних властивостей виливків різної товщини від діапазонів показників хімічного складу сірого чавуну. Встановлені кореляційні зв'язки і коефіцієнти кореляції з позицій теорії ймовірності та розроблено емпіричні формули залежностей механічних властивостей виливків різної товщини від діапазонів значень вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію, визначених методом Монте-Карло. *Раніше з позицій ймовірнісного підходу такі зв'язки і коефіцієнти не були виявлені. Використання цієї розробки дозволяє більш надійно визначити аргументи у задачах хімісклад-властивості виливків з чавуну.*

Вперше сформовано бази промислових даних чавунних виливків, встановлено поля і параметри розподілів хімічних елементів, вуглецевого еквіваленту, ступеня евтектичності, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію та їх зв'язок з механічними властивостями литва. *Ця розробка*

*обґрунтовує доцільність і надає можливість удосконалити стандарти і технічні умови на ливарну продукцію із сірого синтетичного чавуну. Зокрема регламентувати вміст сірки у складі чавуну на рівні не більше 0,05 %*

Розвинуто методику термічного деривативного аналізу рідкого чавуну у процесі литва шляхом уточнення визначення форми термічних кривих охолодження розплаву і порівняння їх з референсними кривими охолодження. Новизна розробок захищена патентом України на винахід і патентом України на корисну модель.

**Практичне значення отриманих результатів.** Створену комплексну методологію запропоновано як науково-прикладну основу для підвищення ефективності технологічного процесу виробництва і якості литва.

Одержані в роботі наукові результати відкривають нові можливості посилення надійності регулювання хімічного складу і властивостей виливків з чавуну та інших сплавів. Розроблено основні положення типової технологічної інструкції щодо контролю і регулювання хімічного складу сірого чавуну в процесі його виплавлення в індукційних печах і виготовлення з нього литва. Типова технологічна інструкція запропонована Міністерством стратегічних галузей промисловості України для опрацювання в промисловій практиці ливарних підприємств (лист Мінстратегпрому №1.2-11.1/5740 від 21.12.2022).

Результати дисертаційної роботи, а також рекомендації, надані автором дисертації, використовуються у практиці ливарного виробництва заводу. Розроблена інструкція найшла застосування на заводі ТОВ «М-ЛИТ» при виготовленні ливарних виробів для залізничного рухомого транспорту.

Удосконалено метод самоадаптивного термічного деривативного експерс-аналізу чавунів, який дозволяє оперативно прогнозувати якість виливків, хімічний склад чавунів на етапі розплаву. Спосіб захищений патентами на корисну модель № 99968 та патентом на винахід № 113333.

Створену комплексну методологію запропоновано як науково-прикладну основу для підвищення ефективності технологічного процесу виробництва і якості литва.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові положення, що викладені в дисертації, розроблені й сформульовані авторкою особисто. Особистий внесок дисертанта полягає в розробці теоретичних рішень та методик, проведенні експериментальних досліджень і аналізі їх результатів, формулюванні висновків і рекомендацій. Здобувач приймала безпосередню участь у підготовці публікацій та обговоренні отриманих результатів на наукових конференціях. Експерименти в промислових умовах виконані авторкою за допомогою колег і персоналу підприємств. Дисертація виконана авторкою самостійно.

У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачеві належить наступне: дослідження властивостей чавуну при розробці нового методу ТДА і ефективності використання модифікаторів [1, 2]; провідна участь у розробці пробовідбірника розплавленого металу та іншої апаратури для контролю технологічних режимів плавок, металографічні дослідження [2, 4]; узагальнення та аналіз технічної літератури і виробничого досвіду, формулювання мети досліджень [3, 6, 13, 15]; постановка завдань, розробка методик та виконання досліджень, узагальнення і аналіз результатів, розробка рекомендацій [7, 16, 17, 19]; аналіз, обґрунтування і формулювання висновків [18, 19, 20, 22]; проведення аналітичного огляду, систематизація даних [21]; постановка завдання, розробка рекомендацій щодо вирішення проблемних питань [23]; проведення розрахунків та аналіз результатів [24]; патентний пошук, створення на рівні винаходів нових технічних рішень, формулювання предмета новизни, участь у розробці формул винаходів [25, 26, 27]; наукові результати, положення, висновки, пропозиції та рекомендації, які представлені у дисертації і що виносяться на захист, належать здобувачеві.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень, базові положення, технічні й технологічні рішення, висновки і рекомендації,

які представлені у дисертації, апробовано на науково-практичних конференціях: XIII Всеукраїнській науково-практичній конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра» (Київ, НТУУ «КПІ» 2015); XI, XV Міжнародних науково-практичних конференціях «Литво» (Україна, Запоріжжя 2015, 2019); VIII науково-технічній конференції «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві» (Україна, Краматорськ 2021); XIX Міжнародній науково-практичній конференції «Литво. Металургія 2023», (Україна, Харків-Київ 2023); VIII International Conference of PhD Students in celebration of 2018 Steel worker's Day (м. Краків). Стендова доповідь; Міжнародній науково-технічній конференції «Miningmetaltch 2023 – Гірничо-металургійний комплекс: інтеграція бізнесу, технологій та освіти» (Запоріжжя 2023); Всеукраїнській науково-технічній конференції «Наука і металургія» (Дніпро 2023).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 34 наукових праць, з них 22 у наукових фахових виданнях, 2 – що індексуються в міжнародних наукометричних базах Scopus, Web of Science, три патенти України та 7 тез доповідей в збірниках матеріалів міжнародних та українських конференцій, 2 патенти України та 1 авторське право на твір.

**Структура дисертації.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, списку використаних джерел (172 найменувань) та 11 додатків, загальний обсяг дисертації – 234 сторінки, обсяг основної частини – 175 сторінок, дисертація містить 53 рисунка та 16 таблиць.

## РОЗДІЛ 1

### СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМ І МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ І ВЛАСТИВОСТЕЙ СІРОГО СИНТЕТИЧНОГО ЧАВУНУ

#### 1.1 Шляхи розвитку теорії і технології ливарного виробництва.

Інноваційні напрями контролю та регулювання хімічного складу і властивостей чавуну, який виплавляють в індукційних тигельних печах, на нинішньому етапі розвитку ливарного виробництва в Україні полягають у наступному.

Діюча на сучасних ливарних підприємствах, як, наприклад, на заводі ТОВ «М-ЛИТ» (м. Нікополь, Дніпропетровської області), наскрізна схема виробництва високоякісного чавуну включає такі основні технологічні стадії, етапи (рис. 1.1). На першому етапі визначається і формується склад шихти для виплавлення чавуну з вмістом хімічних елементів згідно з вимогами стандарту або технічними умовами щодо конкретних ливарних виробів. На другому етапі виробничого процесу безпосередньо при виплавленні чавуну здійснюється відбір проб із розплаву і контролюється його хімічний склад. На третьому етапі на підставі результатів аналізу хімічного складу розплаву чавуну коригується вміст хімічних елементів, які того потребують. Це одна з найвідповідальніших технологічних операцій у виробничому циклі виготовлення ливарної продукції з чавуну.

Суттєва проблема цієї операції полягає в тому, що модифікатори (феросплави, карбюризатори тощо), які застосовуються для корекції чавуну при його виплавленні, мають значну нестабільність вмісту основних хімічних елементів ( $C$ ,  $Mn$ ,  $Si$ ). Тому процедура визначення обсягів внесення у розплав легуючих матеріалів має бути глибоко обґрунтованою і враховувати в ймовірнісному аспекті наявну нестабільність їх хімічного складу. Такий підхід має довести до  $\sim 100\%$  вихід придатного чавуну та забезпечити економічний ефект за рахунок зменшення фінансових витрат на феросплави та інші модифікатори.

В сучасних ливарних заводах на четвертому технологічному етапі, а саме в процесі розливання чавуну у ливарні форми, здійснюється остаточний контроль хімічного складу і властивостей чавуну шляхом термічного деривативного аналізу (ТДА) кривих його охолодження при кристалізації.

Очевидно, що передова сучасна технологія виробництва чавуну впроваджена не на всіх ливарних заводах через невирішеність ряду наукових задач. Саме тому розвиток ливарного виробництва потребує удосконалення і запровадження у промисловості системного аналізу технології виплавлення чавуну з контролем його хімічного складу та властивостей шляхом застосування інноваційної методології контролю і регулювання виробничого процесу. Зокрема і ТДА. Розв'язанню цієї теми й присвячена дана дисертаційна робота.

На рис. 1.1 представлено спрощену блок-схему основних технологічних перетинів виробничого циклу виплавлення в індукційних тигельних печах чавуну для виготовлення ливарних виробів відповідального призначення. На рис. 1.2 – побудову системи контролю, регулювання і прогнозування властивостей сірого синтетичного чавуну на прикладі виготовлення чавунних гальмових (гальмівних) колодок (рис. 1.3) та «клину Ханіна» для залізничного транспорту.

Зазначимо, що в сортаменті продукції сучасних ливарних підприємств чавунні гальмівні колодки займають значний сегмент за обсягом виробництва. Якісний чавун для цих виробів виготовляють здебільшого в індукційних тигельних печах. Показником якості синтетичного чавуну для виготовлення гальмівних колодок є, насамперед, забезпечення жорстких вимог до вмісту вуглецю, марганцю, кремнію, фосфору, сірки в його хімічному складі. Шляхи вирішення цієї задачі детально розглянуто в наступних розділах дисертації<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Авторка даної дисертації висловлює щире подяку за керівництво при виконанні даної роботи науковому консультанту член-кореспонденту НАН України, докт.техн. наук Валерію Леонідовичу Мазуру





Рис. 1.1. Спрощена блок-схема основних етапів виробничого циклу виготовлення ливарних виробів відповідального призначення з сірого синтетичного чавуну, який виплавляють в індукційних тигельних печах, та етапи контролю і регулювання його хімічного складу і властивостей. Неперервні лінії – зв’язки та взаємодія у прямому напрямі; пунктирні – напрями зворотного зв’язку

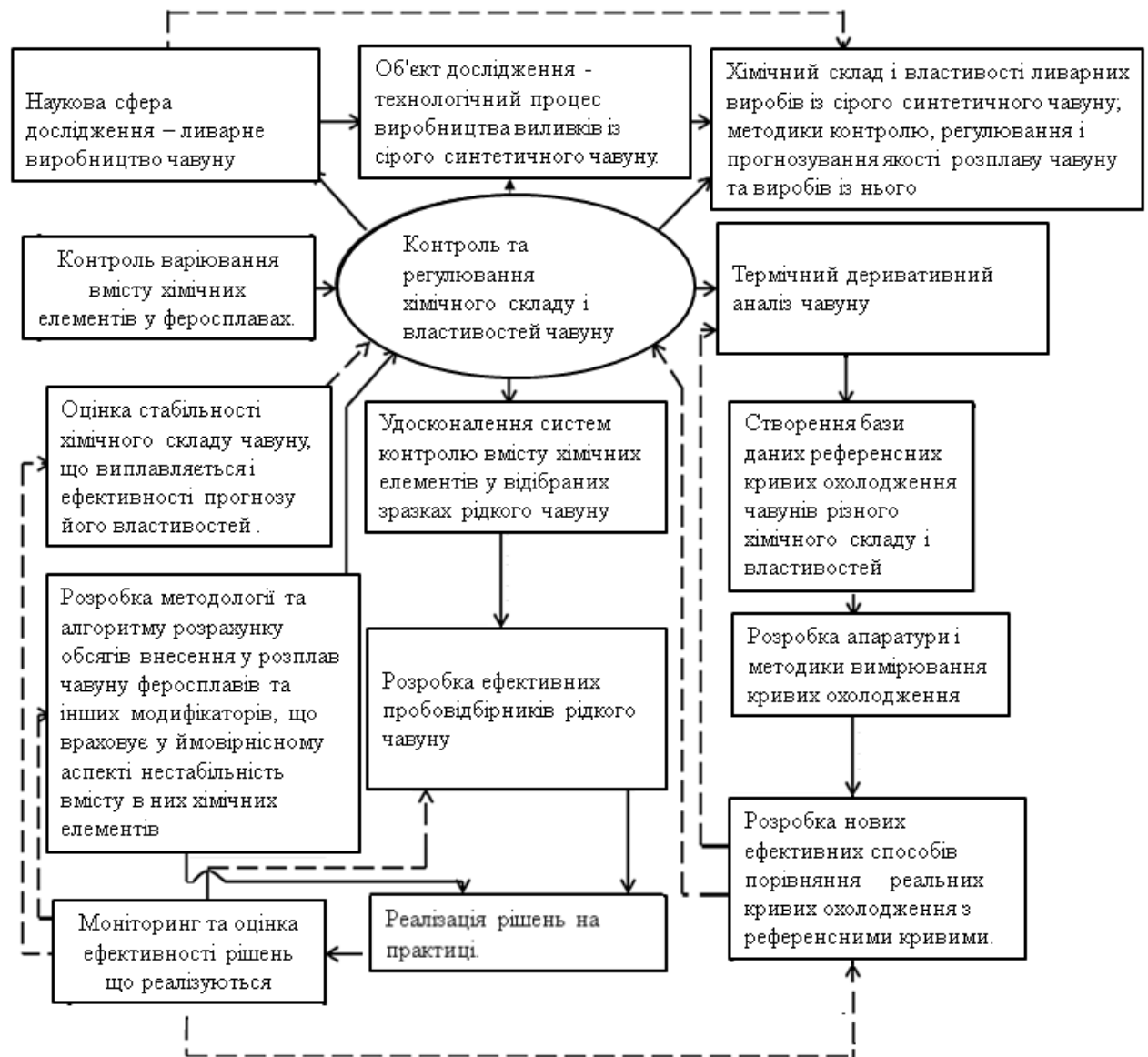


Рис. 1.2. Структурна схема комплексного дослідження за темою дисертації систем контролю і регулювання хімічного складу сірого чавуну, виплавленого в індукційних тигельних печах, та прогнозування властивостей виливків. Безперервні лінії – зв'язки і взаємодія у прямому напрямі; пунктирні – зворотні зв'язки

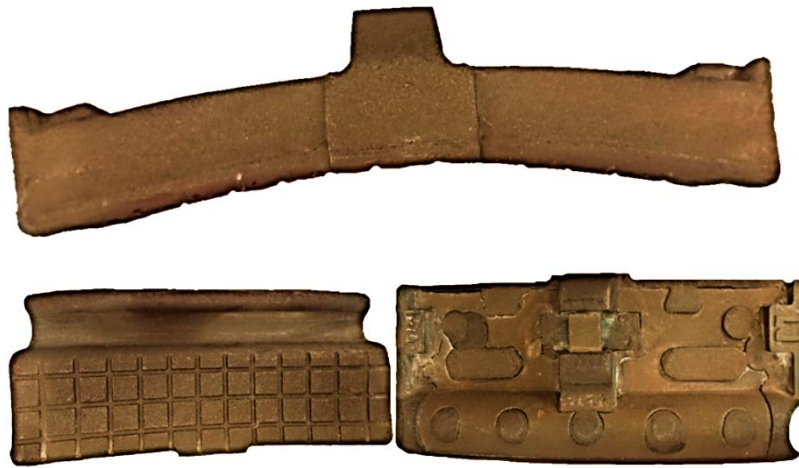


Рис.1.3. Гальмівна (гальмівна) колодка типу «М»

Зусиллями декількох поколінь вчених і виробників розроблені основи теорії та технології виплавлення синтетичного чавуну і виготовлення з нього литва [1–3 та ін.]. Але обладнання і технологія ливарного виробництва постійно удосконалюються. Еволюція зазначеної галузі неможлива без подальшого розвитку наукового фундаменту ливарних процесів. Так, результатом співпраці вчених Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України (ФТІМС НАН України) з промисловцями стало введення в експлуатацію і освоєння наприкінці 2020 року на Нікопольському ливарному заводі трубопровідної арматури (нині назва ТОВ «М-ЛИТ») в м. Нікополь, Дніпропетровської області сучасного електromеталургійного виробництва так званого «синтетичного» чавуну і виготовлення з нього литва відповідального призначення. Зокрема гальмівних колодок і «клину Ханіна» для рухомого транспорту залізниці, засувок для трубопроводів тощо [4].

Традиційне металургійне виробництво розбудовано по схемі: видобування залізної руди і вугілля, виробництво коксу з вугілля, виплавлення чавуну, а далі сталі. У великих об'ємах чавун виплавляють у доменних печах (домнах), використовуючи в якості сировини залізну руду і кокс. До останнього часу в ливарних цехах чавун виплавляли у вагранках, сировиною для яких є чушковий чавун, виготовлений у домнах. Ця традиційна технологія не забезпечує високу якість ливарного чавуну та

виробів з нього і тому не відповідає запитам сьогодення. Головний недолік ваграночного чавуну – надто високий вміст сірки. Суттєві недоліки має й технологічний процес виплавлення ливарного чавуну у вагранках.

Сучасна технологія виплавлення чавуну для виготовлення литвом гальмівних колодок рухомого складу залізниці, запірної трубопровідної арматури, водопровідних засувок, іншої продукції на Нікопольському заводі ТОВ «М-ЛИТ» полягає в тому, що його виробляють способом, альтернативним традиційному – за інверсійною схемою «сталь-чавун», а не, як зазвичай, сталь з чавуну. «Синтетичний» ливарний чавун виплавляють в електричних індукційних печах зі сталевого металобрухту, додаючи у шихту спеціальні домішки – карбюризатори, феросплави тощо. Запроваджена технологія забезпечує можливість отримання ливарного чавуну з мінімальним вмістом сірки та інших небажаних домішок у його хімічному складі.

Науковцями ФТІМС НАН України разом з виробничниками [4] було оптимізовано ще на стадії проектування стратегії модернізації заводу ТОВ «М-ЛИТ» склад обладнання, необхідного для реалізації розроблених наукою технічних рішень. Основою зазначеного найсучаснішого електromеталургійного процесу виробництва високоякісного ливарного чавуну на цьому заводі є трьохтонна індукційна піч виробництва «Inductotherm» (Велика Британія, 2017 р.). Друга черга заводу передбачає спорудження ще однієї трьохтонної печі. Спектральна лабораторія ARL 3460, «Thermo Fisher Scientific» (Швейцарія, 2017 р.); автоматична формувальна лінія «DISA MATCH 32 x 32» (Данія, 2017 р.), розмір кома 813 x 813 x 650 мм, продуктивність – до 100 форм на годину. Автоматичний сумішоприготувальний комплекс «Eirich» (Німеччина, 2017 р.). Стрижневі машини «Leamre» (Німеччина, 2016 р.), спосіб виготовлення Cold-box процес; ділянка великої формовки «OMEGA Foundry Machinery» (Велика Британія, 2016 р.); очисні дробеметні камери і галтувальні барабани; піч для термічної обробки виливків; обладнання для виготовлення стрижневого і

модельного оснащення HAAS (США, 2017 р.) тощо. Можливості виробництва: виготовлення відливок складної конфігурації з чавуну різних марок (СЧ 200-350, ВЧ 400-500); виготовлення відливок вагою до 120 кг з максимальними габаритами 650 x 650 x 350 мм на автоматизованій формувальній лінії (АФЛ); на ділянці крупного формування виготовлення відливок масою до 3000 кг розмірами 2000 x 1300 x 800 мм; виготовлення піщаних стрижнів для ливарного виробництва; проведення дробоструменевої обробки виливків; фарбування виробів. Проектування виробництва виконано із залученням найкращих інжинірингових компаній.

Згідно з передбаченою концепцією розвитку завод ТОВ «М-ЛИТ» оснащений обладнанням провідних у світі машинобудівних фірм, які спеціалізуються у галузі ливарного виробництва. Реалізовані технічні рішення і встановлене обладнання забезпечують світовий рівень енергоефективності та екологічної безпеки на підприємстві. У вигляді конкретного прикладу зазначимо, що обладнання для підготовки піщаноглинистої суміші виготовлене німецькою фірмою «Eirich». Запроваджені технічні рішення зводять практично до нуля вплив людського фактору на виробничий процес. Ця технологічна ділянка забезпечує 60 % якості готового литва. Підприємство має можливість виготовляти литво масою від одного до сотні кілограм на автоматизованій фірмовій лінії (АФЛ), виготовленого фірмою «DISA», і вагою до двох тон на ділянці крупного лиття по технології із застосуванням холоднотвердіючих сумішей і обладнання фірми «OMEGA». При цьому на підприємстві створено замкнутий цикл від проектування відливок до виготовлення модельно-стержневої оснастки. Тривалість циклу не довше 4–6 тижнів, залежно від складності литва, у той час як звичайно на цю технологічну операцію витрачається 3–4 місяці. Продукція заводу сертифікована і постачається не тільки на український, а й на європейські ринки. Таким чином, в Україні є вітчизняні виробники зазначеної ливарної продукції, які мають усі технічні можливості повністю закрити потреби в ній внутрішнього ринку. Ще раз

зазначимо, що саме на сучасному ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» виконані експерименти при проведенні досліджень в рамках плану даної дисертаційної роботи.

Перспективним напрямом щодо використання синтетичного чавуну у ливарному виробництві є виготовлення з нього гальмівних колодок для рухомого складу залізниці [5–7 та ін.]. У цих та багатьох інших роботах показані позитивні ефекти, які досягаються при виготовленні гальмівних колодок з синтетичного чавуну, який виплавляють в електричних індукційних печах, порівняно з виливками з чавуну, виплавленого у вагранках. Фактична якість, підкреслюємо, фактична, реальна якість чавунних колодок, виготовлених на ливарних заводах, де чавун виплавляють у вагранках, апріорі не може повною мірою відповідати сучасним вимогам діючих стандартів і вимогам залізниці до зазначеної продукції. У процесі виплавлення у вагранках неможливо регулювати хімічний склад чавуну. На старих ливарних заводах не передбачена дробоструменева обробка гальмівних колодок для виявлення дефектів на їхній поверхні, оскільки немає необхідного обладнання. Зазначений висновок базується на результатах досліджень технології виплавлення синтетичного чавуну і виготовлених з нього гальмівних колодок на згаданому заводі ТОВ «М-ЛИТ» та досвіді використання колодок в гальмівних системах рухомого складу залізниці. Нижче буде показано, що обладнання і технологія на цьому підприємстві забезпечує отримання металу з вмістом сірки в межах 0,02–0,04 % за відсутності домішок небажаних хімічних елементів. Цей показник гарантує високу якість виробленої продукції взагалі й зокрема гальмівних колодок для рухомого складу залізниці.

Чавун, як і раніше, залишається основним матеріалом, що застосовується для виготовлення гальмівних колодок залізничного рухомого складу різного призначення (вантажних і пасажирських вагонів, локомотивів, електричок тощо). Надійність та ефективність експлуатації колодок із чавуну при швидкостях руху транспортних засобів до 120 км/год перевірено

десятиліттями. У зв'язку з тенденцією підвищення швидкості руху залізничного транспорту ведуться пошуки у напрямі вдосконалення конструкцій гальмівних систем. Чавун є еталонним матеріалом для виготовлення зазначеної ливарної продукції [4–8 та ін.].

Ливарний синтетичний чавун, що застосовується у великих масштабах не тільки для виготовлення гальмівних колодок, а й інших деталей, наприклад фрикційного «клину Ханіна», має специфічні особливості в частині його виплавки, хімічного складу та механічних властивостей у порівнянні з чавуном, виплавленим у доменних печах та вагранках [5–6 та ін.].

Дана дисертаційна робота передбачає поглиблення наукових основ і розробку науково-технічних рішень щодо підвищення ефективності виробництва, покращення якості й експлуатаційних характеристик литва із синтетичного чавуну шляхом розвитку методології контролю, коригування його хімічного складу та властивостей в процесі виплавлення на прикладі виготовлення литих деталей відповідального призначення.

## **1.2. Традиційний підхід до контролю і коригування хімічного складу ливарного чавуну при виплавленні його в індукційних тигельних печах.**

Однією з актуальних задач теорії і технології ливарного виробництва на нинішньому етапі його розвитку є удосконалення методів розрахунку шихти і коригування хімічного складу чавуну безпосередньо в процесі його виплавлення. Вирішення цієї задачі надає можливість підвищити якість ливарної продукції, зменшити енергоспоживання на її виготовлення і собівартість у цілому [1, 9–23 та ін.]. Розвиток комп'ютерних технологій і оснащення ливарних підприємств необхідною технікою забезпечує можливість використання сучасних досягнень у цій сфері для переводу методології контролю і регулювання процесів виплавлення чавуну і виготовлення з нього литва на наступний, вищий науково-технічний рівень.

Зазначене повною мірою стосується математичних моделей розрахунку складу шихти для виплавлення різних металевих сплавів і методик коригування хімічного складу розплавів чавуну, сталей, кольорових металів безпосередньо по ходу плавки.

Майже півстоліття тому українські вчені у своїх монографіях [10,13 та ін.] загострювали увагу науковців і виробників на необхідності розширення використання кібернетичних методів для рішення як нових задач, так і для посилення ефективності відомих рішень традиційних задач ливарного виробництва. Зокрема стосовно розробки оптимальної технології виплавлення синтетичного сірого чавуну. В останні десятиліття в технічній літературі представлені роботи, присвячені розвитку ймовірнісних принципів і підходів щодо постановки і рішення задач у сфері управління процесами ливарного виробництва. Як наочний приклад можна назвати обґрунтовану науково і опрацьовану технологічно методологію визначення і оптимізації складу шихти для виплавлення чавуну, інших металів та сплавів. Також регулювання хімічного складу розплаву чавуну безпосередньо у процесі його виплавлення.

Аналіз технічної літератури, присвяченої цій темі, свідчить, що питанням, пов'язаним з формулюванням математичної постановки задачі розрахунку шихти, оптимізації її складу, вибору підходів і шляхів розв'язання, створенням алгоритмів і програмного забезпечення, присвячено десятки, а може й сотні робіт. Їх результати мають суттєве значення для розвитку ливарного виробництва і металургії у цілому. Питання коригування хімічного складу розплаву чавуну безпосередньо у процесі плавки розглянуто меншою мірою. Технічна література налічує інформацію щодо методології прогнозування якості чавуну і сталі різного сортаменту за результатами комп'ютерного розрахунку складу шихти для їх виплавлення. Так у ґрунтовних роботах [17, 24 та ін.] М.М. Ямшинського докладно представлено розроблені методологію, алгоритми, програмне забезпечення щодо прогнозування властивостей розплаву жаростійких та зносостійких



ливарних сплавів, зокрема, хромомарганцевих чавунів та хромоалюмінієвих сталей, за результатами хімічного аналізу проби металу, відібраної з розплаву у процесі плавки. Перевага запропонованого підходу полягає в його системності та багатогранності.

Забезпечення заданого хімічного складу будь-якого металевого сплаву, зокрема і синтетичного чавуну, завжди починають з розрахунку шихти для його виплавлення. При цьому використовують інформацію з попередньо сформованих баз даних відносно хімічного складу сталевих брухту різних марок, якості та вартості феросплавів тощо. Представлена в роботах [17, 24], комп'ютерна програма має, на думку її авторів, надавати технологу можливість перевіряти правильність розрахунку шихти за вмістом усіх елементів у хімічному складі сплаву, що розглядається. При відхиленні вмісту якогось елемента від заданих меж технолог здійснює перерахунок і, якщо потрібно, то змінює вхідні дані. Слід погодитися з автором роботи [17], що запропонована методика надає можливість здійснювати прогноз хімічного складу чавуну чи сталі в багатовимірному просторі незалежних змінних величин і реалізувати «властивості динамічності, багатофакторності та стохастичності».

Судячи з ґрунтовної роботи [17] і незважаючи на згадування про можливість реалізувати в запропонованих імітаційних моделях «властивості стохастичності», це питання в темі, що розглядається, схоже, всебічно не опрацьовано. Зокрема відносно врахування у ймовірнісному форматі нестабільності хімічного складу матеріалів, які входять у шихту і використовуються для корекції хімічного складу розплаву чавуну або сталі, є певні труднощі.

Задачі і етапи розрахунку шихти, методика визначення розрахункового складу сплаву, який виплавляється, оцінка методів розрахунку шихти, вимоги до шихтових матеріалів детально розглянуто на прикладі виробництва чорних і кольорових металів, наприклад, в книзі А.В.Курдюмова і Е.Б. Тена [23]. Цю монографію можна вважати однією з

найпоширеніших публікацій у сфері оптимізації витрат шихтових матеріалів не тільки при виплавленні сплавів кольорових металів, а й при виробництві чавуну та сталі у ливарній промисловості. Викладена у цій книзі методика вирішення задачі оптимізації складу шихти із застосуванням методу лінійного програмування стала посібником для фахівців, які спеціалізуються у ливарному виробництві. Аналогічні та розвинені далі підходи і шляхи рішення цієї задачі представлені також у роботах [10, 13, 20, 24–40 та ін.].

В книгах [10, 13, 23, с. 37–50; 25 та ін.] надано огляд різних методів розрахунку і оптимізації складу шихти. Автори детально проаналізували переваги і недоліки методів: аналітичного, графічних і графоаналітичних, підбору, послідовного коригування шихти. Було відмічено, що аналітичний метод розрахунку видає лише одне рішення з множини можливих і допустимих. Недоліки графічного і графоаналітичного методів полягають також у складності визначення шихти при відносно великій кількості хімічних елементів, які мають бути у складі готового сплаву і компонентах шихти [22, 26 та ін.]. В тій же книзі [23, с. 44–45] при розгляді недоліків графічного і графоаналітичного методів зазначено, що вони є відносно складними для реалізації при кількості більше двох-трьох елементів, що розраховуються. Із зазначеної причини ці методи мають обмежене застосування.

Недоліки відомих методів розрахунку шихти визначені також і в інших опублікованих роботах. Їх аналіз свідчить, що аналітичний та інші методи розрахунку шихти орієнтовані на забезпечення однозначних конкретних величин вмісту кожного контрольованого хімічного елемента в складі чавуну, сталі чи інших сплавів, що виплавляють. В книзі [25, с. 302] і статті [36] підкреслюється, що при «традиційному» методі розрахунку шихти для визначення кількості шихтових матеріалів зазвичай знаходять середні значення вмісту кожного хімічного елемента, що входять у склад кінцевого сплаву, складають систему лінійних рівнянь і потім її вирішують одним із відомих математичних алгоритмів. Але стандарти на ливарну продукцію

передбачають і регламентують не середні значення, а допустимі діапазони відсоткового вмісту елементів у готовому сплаві, зокрема у чавуні. В статтях [41 та ін.], наприклад, представлені результати статистичних досліджень хімічного складу і властивостей сірого чавуну промислових партій, призначеного для виготовлення гальмових колодок і клину «Ханіна» залізничних рухомих засобів. Показано, що інтервали розкиду величин відсоткового вмісту хімічних елементів у складі чавуну різних партій-плавов суттєві. Ступінь розкиду певною мірою залежить від складу шихти для виплавлення чавуну. Тому слід погодитися з висновками [23, с. 38], що тільки одне рішення з множини можливих, яке видають аналітичний чи інші методи при визначенні складу шихти є їх недоліком.

Щодо розрахунку шихти методом підбору, то його недоліком іноді вважають відсутність чітких принципів вибору базового складу шихти, який зазвичай приймають на підставі практичного досвіду ливарного підприємства. Але цей недолік можна розглядати і як перевагу методу підбору перед іншими, оскільки він максимально наближений до виробничої практики і користується довірою у персоналу ливарних підприємств за простоту і надійність [10, 25, 26 та ін.]. На думку ряду авторів цей метод отримав найбільше розповсюдження на виробництві. Таким чином питання, чи є недоліком методу підбору підхід до вибору орієнтовного складу шихти на базі наявного виробничого досвіду, залишається, дискусійним, оскільки використання такого досвіду при математичному моделюванні ливарних процесів є позитивним фактором.

Додатково можна відмітити, що за судженнями С.Г. Пелиха і М.П. Семесенко на дату опублікування їхньої книги [13, с. 166] загальний недолік аналітичного, графічного і методу підбору складу шихти полягає в тому, що ці методи не враховують вартості компонентів шихти і, відповідно, не передбачають оптимізацію її складу з позиції мінімальних витрат на неї.

В роботах [10, 13, 22, 23, с. 43–50; 24, 25] та багатьох інших публікаціях метод оптимізації складу шихти розглянуто як задачу лінійного

програмування. До того ж, функцію, екстремум якої шукають, вважають цільовою, а систему лінійних і нелінійних рівнянь та нерівностей – обмеженнями. Автори [23], посилаючись на літературні джерела, зазначають, що у розрахунках шихти можлива оптимізація різних показників технологічного процесу виплавлення сплавів. Наприклад за критерій оптимальності можуть бути прийняті максимальна ймовірність досягнення заданих механічних властивостей чавуну або мінімальна вартість деталі, виготовленої з виливка [10, с. 26]. Але найчастіше за цільову функцію приймають мінімум витрат на шихту. Цей критерій оптимізації передбачає пошук мінімуму функціоналу [20, с. 129; 25, с. 302]:

$$Z_{min} = \sum_{j=1}^n x_j C_j,$$

де  $C_j$  – ціна  $j$ -го компонента шихти;  $x_j$  – вміст компонента в шихті. При обмеженнях щодо мінімального та максимального вмісту компонентів [22].

При розгляді цієї теми слід згадати також інші критерії оптимальності складу шихти. Наприклад, при виплавленні сталей різного сортаменту в ДСП-100 оптимальний варіант шихти вибирають за двома критеріями – вартість металошихти і легуючих добавок та швидке і економічне розплавлення завантаженої у піч шихти [29]. В роботі [36] рекомендується у якості цільової функції використовувати вартість плавки, оскільки одна з основних задач ливарного виробництва полягає в тому, щоб отримати кінцевий сплав найменшої вартості.

Симплексний метод лінійного програмування може забезпечувати рішення задачі пошуку екстремуму цільової функції, представленої у вигляді вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності чавуну або іншого показника його якості. В технічній літературі такі приклади поки що не приведені. Але в роботі [10, с. 26] такий підхід до вибору критеріїв оптимальності хімічного складу чавуну передбачається.

В статті [22] В.Ю. Селівьорстова, яка заслуговує на особисту увагу сталеварників, надається інформація щодо розробленого програмного

модуля, який реалізує розв'язання задачі лінійного програмування про підбір шихти з використанням симплекс-методу. В якості критерію оптимізації було обрано саме економічний критерій вартості шихти. Цільова функція – мінімізація витрат на шихту. На прикладі переплавлення низьколегованої сталі в дуговій електропечі показано, що підбір шихти полягає в мінімізації цільової функції при виконанні 33 обмежень. Контролюється 7 параметрів, а шихта може складатися з 9 інгредієнтів. Як бачимо, це зовсім не проста для вирішення задача.

Алгоритми, що дозволяють моделювати різні стадії процесу виплавлення корозійностійких сталей, представлені в роботі [31]. Розрахунок шихти виконується також методом лінійного програмування (симплекс-методом). При відомій наявності шихтових матеріалів та їх вартості розраховується шихта, яка при мінімальній вартості забезпечує заданий хімічний склад виплавленої сталі. Автори статті підкреслюють, що ймовірнісний характер плавки потребує розгляду можливих відхилень ходу процесу від прогнозованого. Розроблена програма передбачає можливість корекції складу розплаву за даними його експрес-аналізу. Вміст коригуючих добавок, необхідних для внесення у розплав, розраховують аналогічно розрахунку шихти оптимального складу. Перевага цієї роботи полягає у намаганні враховувати фізико-хімічні особливості виплавлення сталей зі складним набором хімічних елементів. Незважаючи на акцентуванні питання ймовірнісного характеру процесу виплавлення сталі, ця тема в технічній літературі детально не опрацьована і не висвітлена.

На особливу увагу заслуговують наукові праці на цю тему О.І.Пономаренко та С.Г. Пелиха з колегами. Зокрема, у дисертації Пономаренко О.І. [20, с. 127–136], подібно тому, як це запропоновано також у книзі [23, с. 11], чітко сформульовано основні етапи розрахунку оптимального складу шихти. Перший етап – це визначення вимог, які пред'являють до складу сплаву, що виплавляють, відносно вмісту основних хімічних елементів. Другий – визначення розрахункового складу сплаву. Цей

етап передбачає вибір шихтових матеріалів, введення обмежень на їх використання у шихті, фіксацію хімічного складу кожного компонента шихти, оцінку угару кожного хімічного елемента у процесі виплавлення сплаву залежно від плавильного агрегату тощо. На третьому етапі складаються балансові рівняння за усіма розрахунковими елементами і видом шихтових матеріалів та здійснюється їх рішення. До того ж розрахунки оптимального складу шихти виконуються модифікованим симплекс-методом лінійного програмування [10, 13, 20, 22–27 та ін.]. Така методика розрахунку шихти є надійною і визначається як стандартна. У статті [36] подібний підхід називають «традиційним».

Підкреслимо, що у роботі [20] розрахунок оптимального складу шихти розглядається з позицій системного підходу, з врахуванням не тільки особливостей математичної постановки і розв’язання даної задачі, а головне, й з акцентом на технологічні нюанси виплавлення сплавів, зокрема чавуну, що вкрай важливо для вирішення практичних задач відносно покращення якості ливарної продукції і підвищення ефективності її виробництва. Надано посилання на спільну з В.Ф. Пелихом і А.В. Нікіфоровим публікацію (брошуру) [35]. У наукових працях О.І. Пономаренко, С.Г. Пелиха наголошується на доцільності використання при моделюванні ливарних технологічних систем імітаційно-ймовірнісних підходів та методик для більш повного відображення можливостей виробничих процесів і посилення їх ефективності [20–21].

Враховуючи важливість забезпечення вибором шихти заданого хімічного складу готового чавуну, зокрема не тільки середніх величин відсоткового вмісту хімічних елементів у чавуні, а й їх діапазонів, у роботі [29, с. 132] запропоновано для посилення технологічної надійності шихти приймати в якості нижнього рівня вмісту елементів середні значення дозволених інтервалів. В умовах, коли методика розрахунку шихти не передбачає визначення діапазонів відсоткового вмісту кожного хімічного елемента в складі чавуну, запропоноване рішення є ефективним.

У дисертації, книгах і багатьох статтях С.Г. Пелиха [10, 13, 21, 32 та ін.] глибоко і всебічно, з використанням ймовірнісного підходу, розглянуто проблематику управління якістю ливарної продукції із залізовуглецевих сплавів, математичного моделювання і комп'ютеризації технологічних операцій ливарного виробництва. В тому числі математичні моделі, алгоритми розрахунку і оптимізації складу шихти. Слід відмітити, що публікації [10–13 та ін.] результатів досліджень, виконаних С.Г. Пелихом з колегами у напрямі використання ЕВМ і математичного моделювання технологічних процесів для підвищення ефективності ливарного виробництва були одними з перших у вітчизняній технічній літературі. На ці книги Семесенко М.П. і Пелиха С.Г. посилаються у своїх роботах автори монографії [23] та інші вчені.

Важливо підкреслити, що у книзі Семесенко М.П. і Пелиха С.Г. [10], яка була опублікована ще у 1975 році, увага інженерно-технічних фахівців ливарних цехів машинобудівних заводів акцентована на необхідності поширення застосування ймовірнісно-статистичних підходів у практиці ливарного виробництва. В тому числі – при розрахунках і прогнозуванні параметрів оптимальної шихти. Основна складність у вирішенні цієї задачі обумовлена невизначеністю хімічного складу більшості компонентів шихти. В книзі [10, с. 51] підкреслено, що особливо значні коливання вмісту хімічних елементів спостерігається у металобрухті. Зокрема, вміст кремнію у шихтових матеріалах різних партій може різнитися у 2–3 рази. В останні роки проблема забезпечення ливарних підприємств якісним металобрухтом навіть загострилася у зв'язку з підвищенням в його складі долі металу з неконтрольованим вмістом хімічних елементів [42]. Суттєво підвищилася нестабільність вмісту хімічних елементів у металобрухті, який надходить на підприємства. Більш-менш стабільною величиною у складі шихти для виплавлення чавуну є вміст звороту власного виробництва ливарного заводу, оскільки кількість звороту на підприємстві залежить від способу лиття, сортаменту продукції, що виготовляють, ливникової системи тощо. При

масовому виплавлені чавуну однієї марки частка звороту власного виробництва у шихті складає приблизно (25...30)% у складі шихти [25, с. 355]. На ливарних заводах, де чавун виплавляють у тигельних індукційних печах частка звороту у шихті може бути більшою – до ~ 35 %. У книзі [13, с. 68–79] зазначено, що нестабільність вмісту хімічних елементів у матеріалах, які використовують для формування шихти, коливання величини угару елементів по ходу плавки тощо потребує розглядати процес виплавлення чавуну, включаючи коригування складу розплаву, з позиції теорії випадкових процесів. Зазначимо, що навіть найдосконаліші сучасні методики розрахунку шихти внаслідок нестабільності її компонентів не гарантують отримання на практиці заданого хімічного складу розплаву чавуну, сталі чи іншого сплаву.

Зазвичай комп'ютерні програми, призначені для розрахунку шихти, використовують і для коригування вмісту хімічних елементів у розплаві [31 та ін.]. Методологія визначення маси коригуючих добавок для внесення у розплав чавуну за даними результату експрес-аналізу відібраної проби, яка передбачає застосування ймовірнісного підходу і методу Монте-Карло, представлена у нашій роботі [9]. Необхідність прискорення впровадження на практиці розрахунку шихти за допомогою методик, які побудовані на підходах, що застосовують ймовірнісні моделі, актуалізується [15–16].

У дисертації С.Г. Пелиха [21, 158–166] чітко сформульовано висновок, що, оскільки вміст компонентів шихти, їх угару або пригару у процесі плавки чавуну чи інших сплавів є величинами випадковими, то для врахування ймовірнісного характеру їх розподілу необхідно використовувати ймовірнісні моделі й методи в рішенні задачі вибору оптимального складу шихти. Методи лінійного програмування, які нині широко використовують у цій сфері, не враховують випадковий характер величин, що розраховуються. Для виключення цього недоліку в дисертації [21] розроблено та реалізовано спеціальний ітераційний алгоритм на основі моделі стохастичного програмування з ймовірнісними обмеженнями. В якості критерію оптимізації була прийнята, як й у більшості робіт, мінімальна вартість шихти. Але в



якості ймовірнісних обмежень – умови забезпечення вмісту хімічних елементів сплаву, що виплавляють, із заздалегідь заданими ймовірностями. На час опублікування це рішення представляло принципово новий підхід до задачі вибору шихти для виплавлення різних сплавів. Зазначений підхід щодо застосування ймовірнісних методів у вирішенні задач, пов'язаних з підвищенням точності розрахунків складу шихти завдяки врахуванню випадкового характеру її параметрів, не втратив своєї актуальності донині. Актуальними залишаються також імітаційно-ймовірнісні підходи та моделі щодо вирішення інших задач ливарного виробництва [43].

Таким чином, аналіз технічної літератури щодо розрахунку шихти для виплавлення чавуну, сталі та сплавів призводить до висновку, що відомі методи дозволяють у першому наближенні визначати відсотковий вміст компонентів у складі шихти, виходячи із вимог до хімічного складу литва і наявності необхідних шихтувальних матеріалів на підприємстві. Запропоновано критерії оптимізації складу шихти з позиції забезпечення її мінімальної вартості. Суттєвий недолік відомих методів визначення складу шихти полягає в тому, що у більшості вони орієнтуються на забезпечення однієї конкретної величини відсоткового вмісту хімічних елементів у складі сплаву, що виплавляють [44]. Найчастіше – це середні величини вмісту елементів з діапазонів, регламентованих у стандарті на продукцію, яку виготовляють [25, с. 302]. Нестабільність хімічного складу компонентів шихти у відомих методиках не враховують і ніяк не визначають. Не прогнозують розрахунками і нестабільність вмісту хімічних елементів у складі готового сплаву. У зв'язку з цим не виключені випадки, що навіть коли розраховані «в середньому» величини відсоткового вмісту елементів потрапляють у інтервали їх вмісту, визначені у стандартах чи технічних умовах на вироби, діапазони розкиду цих величин можуть виходити за межі інтервалів, регламентованих стандартами. Для позбавлення цього недоліку необхідно в методиках розрахунку шихти впроваджувати підходи, які враховують у ймовірнісному аспекті нестабільність хімічного складу шихти,

а також діапазони вмісту хімічних елементів сплаву, що виплавляють [9, 15–16].

Аналіз сучасних підходів, методології, методик і методів розрахунку шихти і регулювання хімічного складу чавуну та інших сплавів, що виплавляють, засвідчив необхідність їх подальшого розвитку на основі застосування комп'ютерного моделювання з використанням підходів, враховуючих ймовірнісний характер технологічних процесів у ливарному виробництві. В дисертації (розділи 3.2–3.4) розроблено алгоритм і програму, які вирішують цю задачу [9, 15–16, 19].

### **1.3. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві.**

Вище зазначено, що для характеристики хімічного складу і властивостей чавуну широке розповсюдження в металургії, машинобудуванні, в тому числі ливарному виробництві, отримали показники його вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  і ступеню евтектичності  $S_{\text{евт}}$ .

В роботі [45], наприклад, надано формулювання, згідно з яким «вуглецевий еквівалент являє собою показник еквівалентного (умовного) вмісту вуглецю, який враховує внесок компонентів чавуну на його положення щодо евтектичного складу на псевдо подвійній (бінарній) діаграмі стану залізо–вуглець».

Формула вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  має вигляд [46]:

$$C_{\text{екв}} = C_C + \sum_1^n G_C^i C_i, \quad (1.1)$$

де  $C_C$ ,  $C_i$  – вміст (мас., %) вуглецю та іншого  $i$ -того хімічного елемента у складі чавуну;  $G_C^i$  – вуглецевий еквівалент  $i$ -того хімічного елемента (коефіцієнт перед величиною вмісту елемента).

Зазвичай в технічній літературі формулу  $C_{\text{екв}}$  виражають простіше:

$$C_{\text{екв}} = C + G_C^{Si} Si + G_C^P P + G_C^{Mn} Mn + G_C^S S + \quad (1.2)$$

При цьому, коефіцієнти  $G_C^i$  можуть мати знаки «плюс» чи «мінус» залежно від напряму впливу конкретного елемента на  $C_{\text{екв}}$ . Вуглецевий еквівалент визначають, зазвичай, експериментально, іноді термодинамічними розрахунками. В роботі [46] надано посилання на літературні джерела з прикладами на цю тему. У технічній літературі запропоновано різні формули для розрахунків  $C_{\text{екв}}$ , які дещо різняться між собою. Причина полягає в тому, що кожна з відомих формул була розроблена при вирішенні конкретних наукових або практичних задач для різних за хімічним складом чавунів чи сталей. Відповідно формули мають різний набір хімічних елементів, а також різні величини коефіцієнтів  $G_C^i$ . Наприклад, в статті [46] запропонована формула для розрахунку вуглецевого еквівалента, яка отримана методом регресійного аналізу.

$$C_{\text{екв}} = C_C + 0,3Si + 0,33P - 0,015Mn + 0,26S. \quad (1.3)$$

Вище було показано, що у ГОСТ 27772-88 «Прокат для строительных стальных конструкций» застосовано формулу  $C_{\text{екв}}$ , яка включає 8 хімічних елементів, але не враховує вплив сірки на значення вуглецевого еквівалента сталей, що розглядається у цьому стандарті. Тобто, як правило, формули для розрахунку  $C_{\text{екв}}$  сталей або чавунів розробляють для контролю властивостей конкретної металопродукції.

При виробництві металовиробів відповідального призначення нерідко в нормативній технічній документації регламентують не тільки формулу для розрахунку вуглецевого еквівалента, а й його критичні значення. Наприклад, відповідно до інформації, наведеної в енциклопедичних джерелах, вуглецевий еквівалент штабової сталі 09Г2СФ, призначеної для виробництва багатошарових труб, розрахований за формулою  $C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{V}{5}$ , не повинен перевищувати 0,43 %. В іншому прикладі, а саме при оцінці зварюваності легованих сталей, вуглецевий еквівалент розраховують за дещо іншою формулою  $C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr+Mo+V}{5} + \frac{Ni+Cu}{10}$ . При цьому  $C_{\text{екв}}$  має бути не більше 0,45 мас.%, Для відносно тонкого металу 0,55 мас.%. Зрозуміло,

ці контрольні величини мають уточнюватися щодо конкретних сталей та виробів. Звертаємо увагу, що формули  $C_{\text{екв}}$ , які використовують для оцінки зварюваності сталей, не враховують вміст кремнію. Але при формуванні структури і властивостей ливарних виробів з чавуну кремній є одним з найвпливовіших елементів. Формула (1.2) та інші [45–51] цей аспект відображають.

В даній дисертації розглянуто ряд відомих формул для розрахунку вуглецевого еквіваленту чавуну з використанням даних щодо величини евтектичної точки на діаграмі залізо–вуглець. Додатково звернемося до наступної формули [46]:

$$C_{\text{екв}} = 4,34 + C - C_{\text{евт}}, \quad (1.4)$$

де 4,34 – значення точки евтектики у бінарній  $Fe-C$  системі;  $C$  – вміст вуглецю у складі чавуну;  $C_{\text{евт}}$  – значення точки евтектики на полі термічний переріз системи  $Fe-C-Si-P-Mn-S$  при вмісті  $Si$ ,  $P$ ,  $Mn$ ,  $S$  у чавунах СЧ100, СЧ200, СЧ300.

Автори статті [46] звертають увагу, що, по-перше, згідно з формулою (1.4) при  $C_{\text{евт}} = 4,34$  отримуємо  $C_{\text{екв}} = C$ , %. По-друге, результати розрахунків  $C_{\text{екв}}$  за формулами (1.3) і (1.4) дуже близькі.

. В довіднику [51, с. 17] зазначено, що при розрахунках  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$  за формулами (1.5) і (1.6) чавун характеризують як доевтектичний при  $C_{\text{екв}} < 4,26$  і  $S_{\text{евт}} < 1$ . Це «у багатьох випадках визначає важливі властивості чавуну і ще раз підтверджує значення  $C$  і  $Si$ . Саме тому структурні діаграми будуються найчастіше за цими елементами».

Доречно відмітити, що в дослідженнях властивостей і експлуатаційних характеристик чавуну формули (1.5) і (1.6) використовують найчастіше. Нерідко коефіцієнти в цих формулах дещо змінюють, що принципово не впливає на результати. Часто з формули (1.6) виключають вміст фосфору і представляють [51, с. 31] її у вигляді  $S_{\text{евт}} = C / (4,25 - 0,312 Si)$ . Оскільки ступінь евтектичності має вагоме значення для оцінки ливарних характеристик і механічних властивостей чавуну, то для підвищення точності розрахунку

цього показника шляхом врахування вмісту інших хімічних елементів у чавуні і коефіцієнтів їх впливу в книзі [25] наведено розгорнуту, порівняно з (1.6), формулу для  $S_{\text{евт}}$ , а саме:

$$S_{\text{евт}} = C / (4,26 - 0,3\text{Si} - 0,33P - 0,4S + 0,03Mn).$$

При цьому формула, запропонована для розрахунку вуглецевого еквівалента, має вигляд:  $C_{\text{екв}} = C + 0,3\text{Si} + 0,33P + 0,4S - 0,03Mn$ . Підкреслимо, що в цих рівняннях та інших формулах для визначення  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$  коефіцієнти перед значеннями концентрації хімічних елементів у складі чавуну приблизно однакові.

В книзі [25] та інших літературних джерелах зазначається, що ступінь евтектичності  $S_{\text{евт}}$  чавуну розраховується відповідно з подвійною діаграмою стану  $Fe-C$ . Але при детальному вивченні структуроутворення чавуну бажано використовувати діаграму стану  $Fe-C-Si$  [52 – 55].

Перелік наведених вище залежностей вуглецевого еквівалента  $C_{\text{евт}}$  чавуну від вмісту хімічних елементів у його складі не є вичерпним. Відомі формули, запропоновані для врахування, наприклад, азоту в чавуні, формули для визначення вуглецевого еквівалента алюмінієвих чавунів [54, с. 23, с. 94] тощо.

Відносно питання експрес-контролю хімічного складу і вуглецевого еквівалента чавуну в промислових умовах слід відмітити наступне. В довіднику [54, с. 229] відмічено, що визначення вуглецевого еквівалента термографічним методом виконується за кривою охолодження чавуну, на якій фіксуються температури ліквідусу і солідусу чи інтервал між цими температурами. Універсальних формул, які відображають залежності  $C_{\text{екв}}$  від цих температур, немає, оскільки вони суттєво залежать від технології виплавлення чавунів, їх хімічного складу, інших факторів плавки та лиття. Результати досліджень і удосконалення термічного аналізу залізовуглецевих сплавів за кривими охолодження зразків, тобто за температурами ліквідус і солідус, виконаних у Фізико-технологічному інституті металів та сплавів (ФТІМС) в обсязі даної дисертації, представлено у статті [56 – 60].

Запропоновані у цій роботі методи і засоби експрес-контролю температури і хімічного складу чавунів по ходу плавки зменшують тривалість та вартість контролю та підвищують його експресність в 1,5...4,0 рази.

#### **1.4. Характеристика твердості чавунних гальмівних колодок залізничного транспорту.**

Питання щодо наявності (відсутності) залежності твердості й міцності гальмівних колодок типу «М» від хімічного складу чавуну та його вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  розглянуто в доповіді [47]. Далі представлено розширені результати дослідження цього питання.

Твердість чавунних виливків є одним з головних показників якості, який регламентується в усіх стандартах, в тому числі на продукцію для залізничного транспорту [1, 41, 47 та ін.]. В технічній літературі наведено результати багатьох досліджень щодо можливого впливу твердості і мікроструктури гальмівних колодок з чавуну на показники гальмування рухомого складу залізниці [5–8 та ін.] Згідно з висновками авторів багатьох статей, при швидкостях менше 55 км/год відстань екстреного гальмування локомотивів не залежить від твердості та мікроструктури гальмівних колодок. Підвищена твердість гальмівних колодок нібито погіршує їхні гальмівні властивості, знижує коефіцієнт тертя, збільшує шлях екстреного гальмування в умовах швидкості більшої, ніж середня. Результати досліджень стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій гальмівних колодок типу «М», виготовлених литвом відповідно до вимог ГОСТ 30249-97 на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ», засвідчили [41], що твердість гальмівних колодок вузького сортаменту майже не корелює ні з вмістом елементів у хімічному складі чавуну, ні з його вуглецевим еквівалентом  $C_{\text{екв}}$ . Величини твердості чавуну в двох точках (HB1/HB2) гальмівних колодок між собою корелюють. Коефіцієнт кореляції складає 0,894. Це свідчить про однорідність і рівномірність твердості в масиві матеріалу однотипних гальмівних колодок виробництва заводу ТОВ

«М-ЛИТ».

У статті [57] наведено значення вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М» промислових партій.

Представлені нижче результати досліджень можливої залежності твердості гальмівних колодок від хімічного складу чавуну, з якого колодки виготовлені, в широкому діапазоні величин вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}} = (3,0...6,0)\%$  виконані на базі експериментальних матеріалів, зібраних в монографії [5]. Вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$  розраховували за формулою (3.1), яка наведена в ГОСТ 27772-88 «Прокат для строительных стальных конструкций», і враховує окрім C, Si, Mn, P ще вміст Cr, Ni, Cu, мас.,%.

Залежність твердості HB гальмівних колодок від вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  хімічного складу чавуну, з якого колодки виготовлені, показана на рис. 1.4, де використані дані монографії [5]. Аналогічна залежність представлена на рис. 1.5. Вона побудована на базі даних таблиць 3 і 4 ГОСТ 33695-2015 «Колодки тормозные чугунные для железнодорожного подвижного состава».

При підготовці даних, представлених на рис. 1.5, приймали, що мінімальному значенню вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  відповідало мінімальне значення твердості HB, максимальному  $C_{\text{екв}}$  – максимальна твердість. Такий підхід до розташування даних на рис. 1.5 не є бездоганним з наукової точки зору. Але незважаючи на його певну штучність, є найбільш ймовірним.

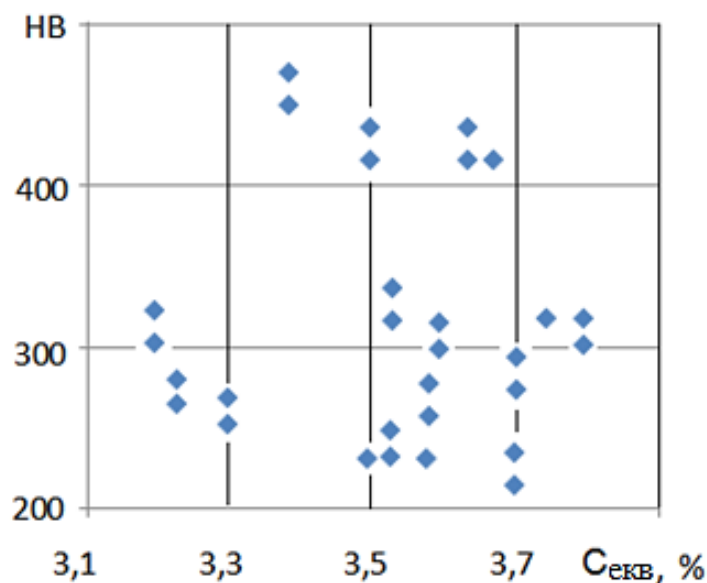


Рис. 1.4. Залежність твердості HB сірого чавуну від вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  його хімічного складу (за даними монографії [5])

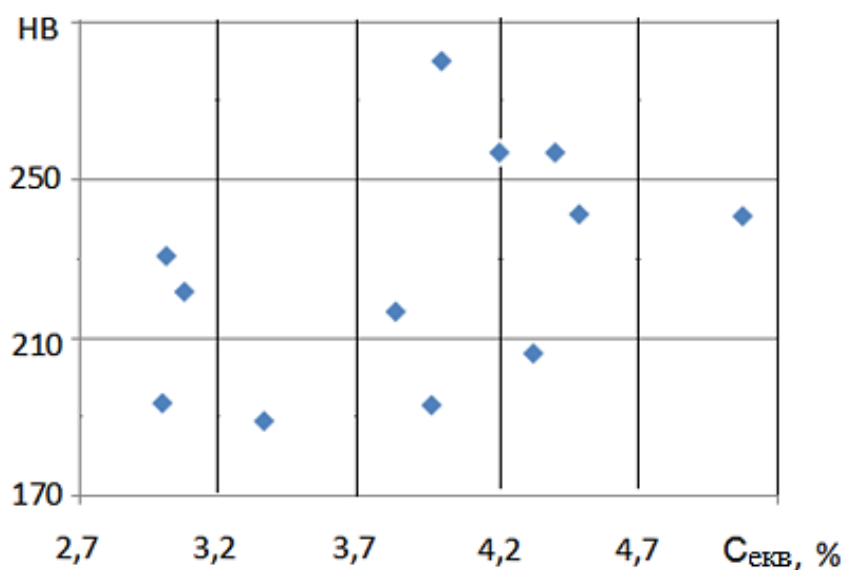


Рис. 1.5. Залежність твердості HB чавуну від вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  його хімічного складу (за даними ГОСТ 33695-2015)

Величини  $C_{\text{екв}}$  на рис. 1.5 представлені в значно ширшому діапазоні, ніж на рис. 1.4, і являють собою узагальнення інформації з ГОСТ 33695-2015. Залежність твердості гальмівних колодок від вуглецевого еквівалента чавуну, з якого вони виготовлені, на рис. 1.5 також не проявляється.



Значний обсяг інформації за темою наявності чи відсутності зв'язку твердості чавуну з його хімічним складом представлено в книзі [60]. У цьому підручнику вказана інша формула, ніж (1.1), а саме формула (1.4) для визначення вуглецевого еквівалента чавуну (мас.%,%) [25, с. 131]. Формула (1.4) є найбільш вживаною при дослідженнях хімічного складу, вуглецевого еквівалента і властивостей чавуну.

В роботі [61] наведено експериментальні дані щодо залежності експлуатаційних показників (величин зносу та довжини шляху гальмування потягів) від хімічного складу гальмівних колодок, в першу чергу від вмісту фосфору в чавуні, які заслуговують на ретельний аналіз. Показано, що при збільшенні вмісту фосфору в чавуні до 2 % зменшується знос колодок і скорочується шлях гальмування. При цьому з підвищенням вмісту фосфору в чавуні вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$  його хімічного складу збільшується. Вищенаведені формули (1.1) і (1.4) відповідають такому висновку. Залежність твердості НВ чавуну від величини вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , що представлена на рис. 1.13, побудована за результатами досліджень автора роботи [61]. Чіткого зв'язку твердості НВ гальмівних колодок з вуглецевим еквівалентом чавуну  $C_{\text{екв}}$ , з якого вони були виготовлені, як бачимо, не проявляється. Має місце слабо виражена тенденція зменшення НВ при збільшенні  $C_{\text{екв}}$  (рис. 1.6).

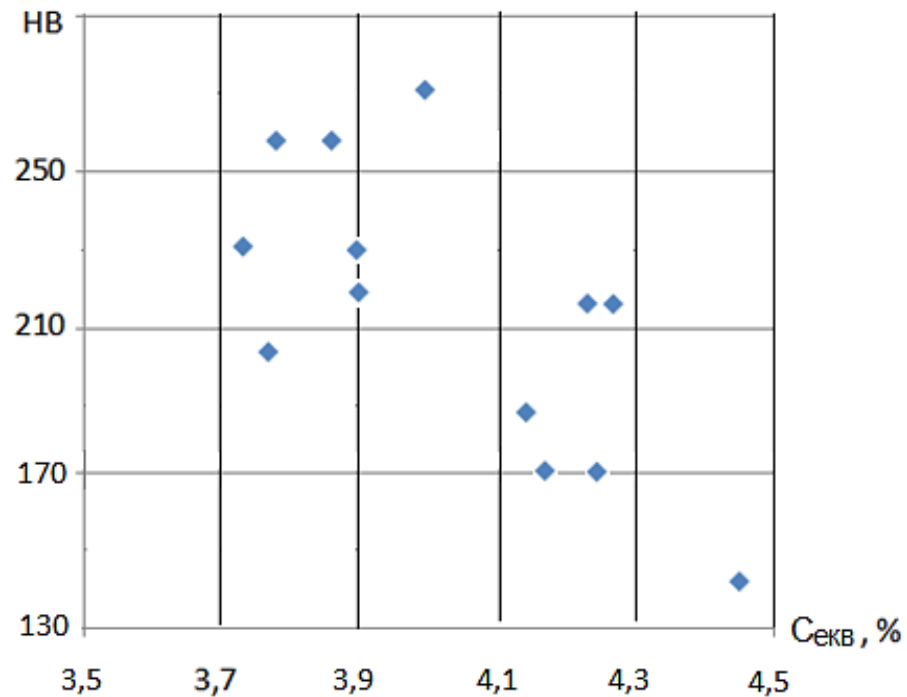


Рис. 1.6. Залежність твердості HB чавуну від вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  його хімічного складу (за даними роботи [61])

Слід зазначити, що в межах визначених стандартом допустимих діапазонів вмісту хімічних елементів у чавуні значення вуглецевого еквівалента можуть суттєво різнитися. Зазвичай прийнято в формулі для розрахунку  $C_{\text{екв}}$  чавуну використовувати більші значення вмісту хімічних елементів у їх діапазонах. Відповідно в такому випадку розрахована величина  $C_{\text{екв}}$  буде мати максимальне значення. При використанні в розрахунковій формулі мінімальних значень вмісту елементів у хімічному складі чавуну величина  $C_{\text{екв}}$  буде мінімальною. Але фактично на практиці вміст кожного елемента в чавуні є величиною випадковою. Визначення можливого діапазону розподілу вуглецевого еквівалента від  $C_{\text{екв}_{\min}}$  до  $C_{\text{екв}_{\max}}$  необхідно для прогнозування властивостей чавуну, що виплавляють. Розглянемо це питання на прикладі хімічного складу чавуну, призначеного для виготовлення колодок типу «М».

Згідно з вимогами ГОСТ 30249-97 чавун для гальмівних колодок типу «М» повинен мати наступний вміст елементів, мас.%,  $C = 2,7...3,4$ ;  $Si =$

0,7...1,0;  $Mn = 0,4...0,9$ ;  $P = 0,4...0,9$ ;  $S \leq 0,20$ . При розрахунках  $C_{екв_{max}}$  за формулою (1.4) використовуємо максимальні величини вмісту елементів. Вміст  $Mn$  приймаємо мінімальним, оскільки в формулі  $Mn$  зі знаком «мінус». Вміст сірки приймаємо 0,20 мас.,%. Отримуємо  $C_{екв_{max}} = 4,065 \%$ . Аналогічно розраховуємо  $C_{екв_{min}}$  при  $S = 0,05 \%$  і при знаку «плюс» для  $Mn$ . Маємо  $C_{екв_{min}} = 3,035 \text{ мас.,\%}$ . Таким чином максимально можливий діапазон величини вуглецевого еквівалента чавуну зазначеного хімічного складу дорівнює (3,035...4,065)%. Як бачимо, різниця між теоретично можливими мінімальним і максимальним значеннями  $C_{екв}$  досягає  $\sim 30 \%$ . Відмітимо також, що цей діапазон  $C_{екв}$  суттєво менший, ніж діапазон (3,13...3,64) значень  $C_{екв}$ , який отримують при аналізі хімічного складу чавуну промислових партій [41, 47, 57 та ін. ].

Автори роботи [25] підкреслюють, що при  $C_{екв} < 4,26 \%$  чавун є доєвтектичним, при  $C_{екв} > 4,26$  – заєвтектичним. В таблицях 5.2, 5.4, 5.5 книги [25] наведено дані щодо твердості НВ за Брінеллем чавунів різного хімічного складу (феритного, перліто-феритного і перлітного класу) при вуглецевому еквіваленті в межах  $C_{екв} = (2,8...4,5)\%$ . Складність аналізу даних цих таблиць полягає в тому, що в багатьох випадках при незначних діапазонах розкиду величин  $C_{екв}$ , як наприклад за даними книги [25]  $C_{екв}$  ковкого чавуну змінюється від 2,86 до 2,89 (%), а діапазон значень твердості складає від 100 до 320 НВ. Відповідно до зазначених даних навіть середні значення твердості НВ не залежать від вуглецевого еквівалента чавуну, що був досліджений.

Твердість сірого чавуну, який виготовляли за вимогами ГОСТ 1412-79, спостерігалася на стабільному рівні (190...230 НВ) при  $C_{екв} \sim (3,1...4,3)\%$  [25]. При аналізі даних відносно твердості НВ феритного, перліто-феритного та перлітного чавунів [25, табл. 5.2] проглядається слабка тенденція щодо  $C_{екв}$ . Але, якщо при однаковому хімічному складі чавуну його твердість

змінюється в  $\sim 1,5$  рази, то стверджувати про наявність залежності НВ від  $C_{\text{екв}}$  немає підстав.

Наведені на рисунках 1.4 і 1.5 результати дозволяють зробити висновок, що у вузькому діапазоні величин вуглецевого еквівалента хімічного складу чавунів, в тому числі, з якого виготовляють гальмівні колодки залізничного транспорту, залежність їх твердості від визначеного стандартом хімічного складу і хімічного еквівалента  $C_{\text{екв}}$  чавуну не проявляється. Підкреслимо, що мова йде про чавун, хімічний склад якого відповідає вимогам стандарту на ливарні вироби, які розглядаються, бо згідно з формулами 1.1–1.4 та ін. однакові значення  $C_{\text{екв}}$  вуглецевого еквівалента можна отримати при суттєво різних величинах вмісту хімічних елементів у чавуні. Цей висновок відображає не тільки дані, представлені на рис. 1.4 і 1.5, а й результати дослідження якості гальмівних колодок, вироблених на заводі ТОВ «М-ЛИТ» [41, 47, 57]. Стабільність хімічного складу, твердості та інших механічних властивостей промислових гальмівних колодок і «клину Ханіна» для залізничного транспорту, досліджено в розділі 3 дисертації.

Результати досліджень свідчать, що визначальний вплив на твердість і експлуатаційні можливості чавунних гальмівних колодок має мікроструктура чавуну, з якого вони виготовлені. Також зазначимо, що на твердість поверхні чавунних виробів може впливати їх галтування, яке виконують для очищення поверхні від пригарів тощо. Результати досліджень [41, 47, 57 та ін.], літературні джерела та виробничий досвід [4, 6–7, 62–63 та ін.] однозначно свідчать і підкреслюють необхідність дробоструменевої обробки поверхні чавунних виливків відповідального призначення, замість їх галтування для виявлення дефектів на їх поверхні. Для прикладу, скриті дефекти гальмівних колодок можуть пошкодити робочою поверхню коліс залізничного транспорту, що є вкрай небезпечним для життя.

Незважаючи на широке розповсюдження вуглецевого еквівалента в якості узагальненого показника хімічного складу чавуну і сталі, а також

властивостей різних металевих виробів, значення вуглецевого еквівалента, особливості та межі його використання в дослідженнях і промисловій практиці потребують детального наукового обґрунтування. Наведені вище результати досліджень хімічного складу і властивостей чавуну, з якого виготовляють гальмові колодки типу «М», дають підстави рекомендувати для характеристики виробів з чавуну використовувати поле і параметри розкиду величини вуглецевого еквівалента, розрахованого з використанням ймовірнісного підходу та методу Монте-Карло при визначенні величин вмісту кожного елемента відповідно до хімічного складу чавуну, регламентованого в стандарті.

### **1.5. Стан розвитку та недоліки відомих методик ТДА хімічного складу і властивостей чавуну.**

Метод ТДА базується на підтвердженому багатьма дослідниками факті, що форма кривої охолодження, виміряна термopарою, всебічно відображає процес затвердіння чавуну в стаканчику-пробовідбірнику з урахуванням всіх впливових факторів (хімічного складу, вмісту домішок та інше) [60, 64-71]. Будь-яка зміна якості розплаву чавуну супроводжується зміною форми кривої його охолодження. Тому вимірювання форми кривої охолодження на ділянці затвердіння дає можливість швидко, точно і всебічно оцінювати якість виливків та визначити необхідність подальшої металургійної обробки рідкого чавуну, передбачати кінцеві показники його структури та властивостей.

Термічний деривативний аналіз (ТДА) базується на тому, що фізичне тепло, вивільнене при охолодженні розплаву чавуну, і латентне (приховане) тепло його твердіння можуть бути виміряні та співвіднесені з твердою фазою, яка зростає по мірі виділення її з розчину. Рідкий сірий чавун твердне з утворенням первинного аустеніту із виділенням тепла, що спричиняє температурну зупинку. Температура, за якої відбувається ця зупинка, визначає прямий вимір вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  [72]. Величина  $C_{\text{екв}}$ , зафіксована ТДА, представляє кінетичну та фізичну картину затвердіння

виливка. Відмінності у зародкоутворенні та зростанні сірого чавуну з пластинчастим графітом (ЧПГ), ЧШГ (чавуну з кулястим графітом) та ЧВГ (чавуну з вермикулярним графітом) забезпечують чіткі відмінності відповідних кривих охолодження (рис. 1.7). Ці відмінності дозволяють використовувати їх для визначення особливостей затвердіння та призначення заходів контролю якості рідкого чавуну. Вважається [72], що висновки про мікроструктуру чавуну та форму графіту за результатами прямого ТДА чавуну є більш надійними, ніж за даними хімічного аналізу. Типові криві охолодження чавунів із різною морфологією графіту наведені на рис. 1.7.

До трьох основних вихідних показників ТДА чавунів відносять вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$ , індекс модифікування та індекс інокулювання. Два зазначені індекси шведська компанія «Sinter Cast», наприклад, визначає автоматично на основі оцінки понад 100 різних параметрів кривих охолодження, математичних похідних та виділення тепла. Однак, відтворення однакового хімічного складу чавуну в кожному ковші, незважаючи на сталість технологічного процесу, не може бути гарантована [73].

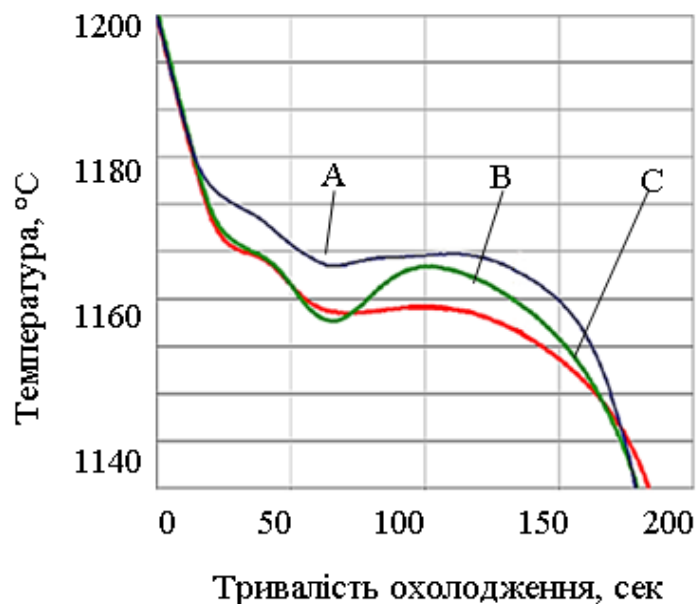


Рис. 1.7. Типові криві охолодження чавунів з різною морфологією

графіту [72]: А – сірий чавун із пластинчастим графітом; В – чавун із вермикулярним графітом; С – чавун із кулястим графітом

Традиційна методика реалізації термічного деривативного аналізу (ТДА) передбачає вимірювання температур  $T_L$  і  $T_{EC}$  за допомогою ТДА у фіксованих лабораторних або промислових умовах з подальшим складанням регресійних формул, що відображають вплив виміряних температур аустенітного ліквідусу  $T_L$  та метастабільної (цементитної) евтектики  $T_{EC}$  фазової діаграми. Для цього експериментально визначають дві температурні точки метастабільної фазової діаграми чавуну: температуру аустенітного ліквідусу  $T_L$  та температуру затвердіння цементитної евтектики  $T_{EC}$ .

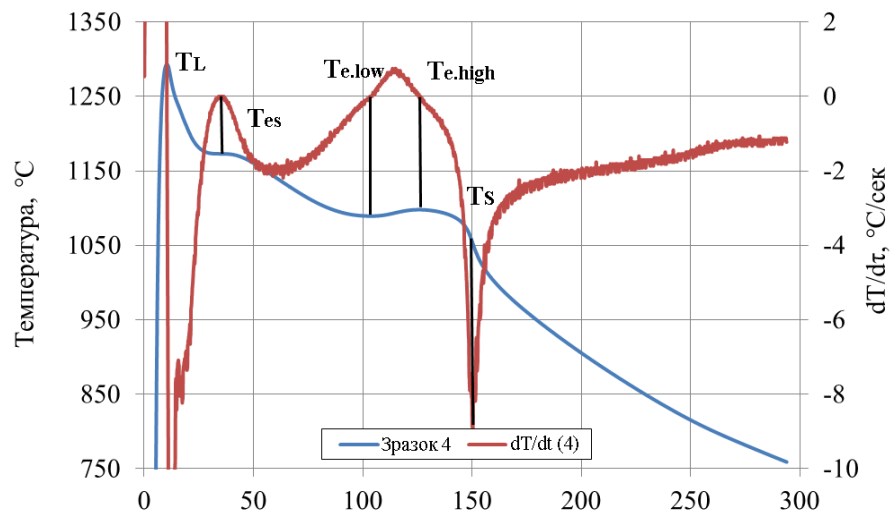


Рис. 1.8. Інтерпретація кривої охолодження дослідного зразка доевтектичного чавуну за методикою [74].

Підхід [74] до інтерпретації кривої охолодження дослідного зразка доевтектичного чавуну, що застосований при виконанні даної дисертаційної роботи, наведено на рис. 1.8. На цьому рисунку позначено:  $T_L$  – температура ліквідус, від  $T_L$  до  $T_{e.low}$  відбувається утворення переважно первинного аустеніту;  $T_{e.low}$  – нижня евтектична температура. Якщо  $T_{e.low}$  занадто низька, то швидкість зародження/інокуляція занадто низька. Виникає ризик утворення дефектів у кутах і тонких перетинах виливка. Ризик небажаної форми графіту тип D та E;  $T_{e.high}$  – вища евтектична температура. Вища

евтектична температура залежить від складу сплаву, а також від зародження евтектики і, отже, від осадження графіту;  $TS$  – температура солідус.

Визначення вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  за допомогою ТДА на основі фазової діаграми має суттєві обмеження. При зростанні  $C_{\text{екв}}$  зупинка аустенітного ліквідусу наближається до евтектичної так, що обидві температурні зупинки збігаються. Виділення первинного графіту при кристалізації заевтектичного сірого чавуну через низьку кількість латентної (прихованої) теплоти кристалізації, не забезпечує видимої температурної зупинки на кривій охолодження. З метою розширення меж вимірювання  $C_{\text{екв}}$  в чавун додають сильний антиграфітизуючий елемент телур (або його з'єднання), внаслідок чого чавун кристалізується не сірим, а повністю білим [72, 75]. Введення токсичного телуру [74] є обов'язковим при використанні пробовідбірників фірм «Leeds and Northrup» [60, 76] та «Electro-Nite» [60].

Розрахунки за допомогою регресійних формул та коефіцієнтів, наведених у роботах Британської Дослідницької Асоціації Ливарного Чавуну (BCIRA) [75] є можливими лише при вимірюванні  $T_L$  і  $C_{\text{екв}}$  абсолютно білого чавуну, що отримується при застосуванні телуру. Але за даними компанії «Хереус Електро Найт», яка є світовим лідером у реалізації термічного аналізу, розрахунки забезпечують лише грубу оцінку вмісту  $Si$  навіть при низькому вмісті  $P$ .

Дослідження Сілезького Технологічного Інституту (Польща) на відтворюваність результатів визначення хімічного складу сірого чавуну з використанням методики та апаратури компанії «Хереус Електро Найт» [73] у виробничих умовах показали, що вимогам відповідали лише 45 % аналізів  $Si$ , 50 % –  $C$  та 60 % –  $C_{\text{екв}}$ . Результати щодо механічних властивостей відповідали вимогам лише у 6 % від показників твердості  $HV$  та 13,8 % – тимчасового опору розриву  $\sigma_B$ . Ці результати засвідчили, що в існуючому вигляді традиційна методика ТДА з використанням регресійних формул потребує суттєвого доопрацювання з метою адаптації до типів та марок чавунів, які виплавляються у конкретному ливарному цеху.



Відомим є метод термічного експрес-аналізу рідких чавунів з автоматичною інтерпретацією кривих охолодження. Шведська компанія «Nova Cast», розробила адаптивну систему термічного аналізу ATAS для аналізу, оптимізації та стабілізації виробництва виливків з ЧВГ та ЧШГ [76, 78 та ін.]. Система ATAS [74] у кожному конкретному випадку виробництва виливків враховує сумарний вплив на затвердіння чавуну всіх базових хімічних елементів, газів, оксидів та інших сполук, присутніх у розплаві. При цьому сумарний ефект оцінюють по величині ACEL (the Active carbon equivalent) [72] і на температурі ліквідусу. Головний компонент системи ATAS – це модуль-верифікатор (ATAS Verifier) термічного аналізу з вбудованою системою для всебічної оцінки якості розплаву та можливого ризику утворення дефектів у виливках. Функція «Ризик–Пояснення» дозволяє користувачеві зберігати та повторно використовувати власний досвід виробництва литва. Верифікатор обслуговує одночасно 4 пробовідбірники.

В той же час дане рішення має суттєві недоліки. По-перше, в системі застосовані наливні пробовідбірники, недоліки яких детально розглянуто нижче. По-друге, для реалізації цього способу ТДА потрібні висококваліфіковані, спеціально навчені кадри.

Відомим є також метод ТДА, запропонований китайськими дослідниками [59, 78, 79], апробований та реалізований на підприємствах КНР для контролю якості чавунних виливків (ЧПГ, ЧВГ та ЧШГ), а також виливків із алюмінієвих сплавів [50, 64–65, 75–84]. Цей спосіб проаналізовано в наших роботах [58, 78, 79, та ін.].

При реалізації способу ТДА якість рідкого чавуну оцінюється шляхом порівняння термічної кривої його охолодження (ТКО) з так званою референсною кривою охолодження (РКО), яка відповідає показникам якості чавуну заданого сортаменту із заздалегідь сформованої бази референсних кривих охолодження (РКО). Тобто РКО є еталоном для термічних кривих охолодження проб рідкого чавуну, які аналізуються. Підкреслимо, що

референсна крива охолодження (РКО) відображає набір показників хімічного складу (вмісту вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору, сірки та інших елементів) чавуну з різною мікроструктурою відповідно до вимог, викладених у стандарті на продукцію, що розглядається. Особливість методу полягає в тому, що криві ТКО и РКО порівнюються за допомогою так званого критерію розпізнавання  $\Omega$  (омега), який дозволяє кількісно виявляти наскільки подібні за формою криві охолодження, які порівнюються на інтервалі затвердіння від аустенітного ліквідусу ( $T_L$ ) до евтектичного солідусу ( $T_S$ ) [59, 78, 79]. Чим менша величина критерію, тим більше подібні форми кривих, що співставляються. Якщо критерій мінімальний або дорівнює нулю, то дві порівнювані криві представляють найбільш подібну за формою пару кривих і в цій парі властивості чавунів вважаються однаковими.

На наш погляд, базова формула для порівняння зазначених кривих охолодження має суттєві недоліки, а саме: модуль суми різниць суттєво занижує кількісний показник розбіжності, а також введення у формулу дисперсії повною мірою не відповідає принципам статистичного аналізу та обробки числових результатів досліджень, оскільки дисперсія характеризує розкид значень результату, а сам числовий результат, що забезпечується методом ТДА, характеризується середнім арифметичним.

Суттєвими недоліками відомих методів ТДА є недосконалі конструкція пробовідбірника та спосіб відбору проб рідкого металу. На підставі аналізу та узагальнення недоліків відомих методик і способів ТДА при виконанні даної дисертації сформульовано вимоги, дотримування яких забезпечує підвищення метрологічних характеристик та експресності, а також зниження вартості контролю температури та хімічного складу залізобуглецевих сплавів. Головна вимога полягає в тому, що метод ТДА має забезпечувати стабільність об'єму та температури відібраних проб, рівномірність тепловідводу, екологічність пробовідбірників, універсальність та адаптивність способу обробки кривих охолодження. Згідно з визначеними

вимогами необхідно чавун, що виплавляють, розглядати як об'єкт експресного термічного контролю; удосконалити методики експресного контролю хімічного складу чавунів; запропонувати, виготовити та дослідити на практиці нові ефективні засоби експресного контролю багатоеlementного хімічного складу чавунів.

### **Висновки до розділу 1.**

Основною метою удосконалення технології ливарного виробництва на базі реалізації інноваційних рішень є розширення сфери і обсягів використання чавунного литва при одночасному підвищенні стабільності показників якості ливарної продукції. Відповідно актуальними є питання модернізації й підвищення ефективності технології ливарного виробництва шляхом пошуку інноваційних методів і систем контролю та регулювання процесів плавки й лиття чавуну.

Стосовно методики, способів, систем контролю і регулювання процесу виплавлення синтетичного чавуну в індукційних тигельних печах необхідно зазначити, що регулювання цих процесів безпосередньо під час плавки та лиття можна розглядати у широкому та вузькому вимірюваннях. Перший підхід передбачає дослідження певних питань виключно у вузькій сфері ливарного виробництва конкретної продукції. Другий – розширює масштаб досліджень і на область використання ливарних виробів у їх споживачів. Тобто ефект науково-технічних рішень, які пропонуються, розглядається не тільки на локальному рівні відносно конкретної технологічної операції, що також є важливим, а оцінюється в широкому розумінні – з урахуванням масштабного фактору, відносно впливу удосконалень, які реалізують в ливарному виробництві, на експлуатаційні характеристики ливарних виробів при їх споживанні.

Проаналізовано питання щодо сутності понять вуглецевого еквівалента, показника ступеня евтектичності та відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію для характеристики хімічного складу і властивостей сірого чавуну.

## **РОЗДІЛ 2**

### **МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ У ЙМОВІРНІСНОМУ ПІДХОДІ ВЕЛИЧИН УЗАГАЛЬНЕНИХ ПОКАЗНИКІВ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЧАВУНУ І ПРОГНОЗУВАННЯ НА ЇХ ОСНОВІ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВИЛИВКІВ**

Основним методом дослідження є системний аналіз теоретичних і експериментальних результатів, технологічних рішень, сформованих баз даних щодо хімічного складу і механічних властивостей виливків із сірого синтетичного чавуну, виплавленого в індукційних тигельних печах. Дослідження виконані із застосуванням сучасних аналітичних та експериментальних методів: фізичного та математичного моделювання, стандартних методик визначення хімічного складу і механічних властивостей чавуну, а також методології коригування хімічного складу розплаву сірого чавуну безпосередньо в процесі його виплавлення, термічний деривативний експрес-аналіз якості сірого чавуну. Обробку експериментальних даних виконували з використанням методів математичної статистики.

#### **2.1. Методика врахування в ймовірнісному аспекті нестабільності хімічного складу шихти для виплавлення ливарного чавуну.**

На першому етапі забезпечення необхідного хімічного складу синтетичного чавуну, який виплавляють в індукційних тигельних печах, треба розрахувати потрібні обсяги компонентів шихти. Ці розрахунки базуються на інформації щодо вмісту хімічних елементів в складових шихти (металобрухті, феросплавах, карбюризаторах тощо). В промисловій практиці металобрухт, який постачається на підприємства, нерідко має значну неоднорідність і нестабільність хімічного складу. У випадках, коли в металобрухті спостерігається збільшений вміст легованої сталі, шихтовку змінюють з урахуванням наявної ситуації, а коригування хімічного складу чавуну в процесі плавки ускладнюється.

Подальша корекція хімічного складу розплаву чавуну здійснюється за результатом його контролю безпосередньо в процесі плавки. Ця технологічна операція потребує ретельного розрахунку обсягів внесення в розплав чавуну необхідних коригуючих матеріалів.

В розрахунках необхідної кількості матеріалів, які додаються у розплав чавуну для доведення його хімічного складу до заданого стану, використаємо такі позначення:  $q$  – обсяг (маса) розплаву чавуну, хімічний склад якого коригується, кг;  $E_q$  – вміст елемента, що коригується, в хімічному складі готового чавуну, %;  $E_z$  – вміст елемента в розплаві за результатом безпосереднього заміру, %;  $\Delta E = (E_q - E_z)$  – величина, на яку необхідно підвищити вміст елемента в чавуні, %;  $\Delta q_M$  – обсяг матеріалу, який необхідно додати в розплав для отримання заданого вмісту в чавуні хімічного елемента, що коригується, кг;  $E_M$  – вміст хімічного елемента, що коригується, у матеріалі, який додається в розплав чавуну, %;  $U_r$  – величина угару елемента, що контролюється, в процесі розплавлення доданого в розплав коригуючого матеріалу, %.

Недостатня кількість (за масою) елемента, що коригується, в розплаві дорівнює  $q \cdot \Delta E / 100$ , кг. З іншого боку кількість (за масою) коригуючого елемента, який додається в розплав, визначається виразом  $\Delta q_M \cdot E_M / 100$ , якщо немає угару матеріалу. Тобто угар не враховується. Якщо матеріал, який додається, вигорає, то вміст коригуючого елемента в ньому зменшується з одиниці до  $(1 - U_r / 100)$ . Відповідно вираз для розрахунку обсягу коригуючого елемента, що додається у розплав, приймає вигляд  $(\Delta q_M \cdot E_M / 100) \cdot ((100 - U_r) / 100)$ , кг. Прирівнявши його величині  $q \cdot \Delta E / 100$ , отримуємо відому [9] формулу розрахунку необхідної кількості (кг) коригуючого матеріалу для введення у розплав:

$$\Delta q_M = \frac{100 \cdot q \cdot \Delta E}{E_M (100 - U_r)} \quad \text{або} \quad \Delta q_M = \frac{100 \cdot q \cdot (E_q - E_z)}{E_M (100 - U_r)} \quad (2.1)$$

Методологія розрахунку обсягу  $\Delta q_M$  добавки матеріалу, коригуючого хімічний склад чавуну, має будуватися на ймовірнісному підході [85], так як що майже усі перелічені похідні у формулах є величинами випадковими. Такий підхід слід використовувати як при формуванні шихти, так й в процесі коригування складу чавуну під час плавки, використовуючи результати безпосереднього заміру вмісту хімічних елементів.

Серед похідних особливої уваги заслуговує показник Уг ступеня, відсотку угару елементів в процесі розчинення коригуючого матеріалу в розплаві, оскільки цей параметр чутливо впливає на розрахункову величину  $\Delta q_M$ . Питання угару елементів у хімічному складі чавуну, як і сталі, при їх виплавленні глибоко досліджено теоретично і експериментально та детально висвітлено в багатьох наукових публікаціях. Внаслідок значної кількості факторів, які впливають на угар хімічних елементів у чавуні, в промислових умовах відсотки угару на заводах різні. На ливарному підприємстві ТОВ «М-ЛІТ» при виплавленні синтетичного чавуну для виготовлення гальмівних колодок і «клину Ханіна» угар елементів у середньому складає: вуглецю – приблизно 5 %; Si ~ 3 %; Mn ~ 10 %. В першому наближенні будемо вважати, що сірка і фосфор в процесі плавки майже не вигорають. Ця інформація прийнята за орієнтир при виконанні даної дисертаційної роботи.

В роботах [9, 15–16, 19] показано, що в методології коригування в процесі плавки хімічного складу чавуну одними з основних для вирішення є питання визначення «ведучого» елемента, який потребує першочергового регулювання і вибору «точок прицілювання» при коригуванні вмісту кожного елемента.

В даній роботі запропоновано напрям удосконалення методики корекції хімічного складу чавуну при виплавленні в індукційних тигельних печах, яка передбачає врахування в ймовірнісному аспекті нестабільності матеріалів, що додаються у розплав при коригуванні в ньому конкретних хімічних елементів за результатами експрес-аналізу проб металу, відібраних

з розплаву. Алгоритм визначення необхідної кількості легувального матеріалу для внесення у розплав при коригуванні вмісту конкретного хімічного елемента передбачає застосування методу Монте-Карло [85] для врахування ймовірнісних оцінок вхідних даних відносно нестабільності властивостей (вмісту хімічних елементів) матеріалів, які використовують для регулювання складу чавуну.

Зазначена тема розглядається далі в основному на прикладі синтетичного чавуну, призначеного для виготовлення гальмівних колодок і «клину Ханіна» залізничного транспорту. При цьому під поняттям «синтетичний чавун» будемо розуміти, як і у попередніх розділах дисертації, сплав, синтезований з простих за складом компонентів – вуглецю, заліза, сталевого металобрухту, феросплавів тощо [62, с. 180]. При розгляді методики визначення шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах перш за все зазначимо, що задача прогнозування вмісту хімічних елементів у складі чавуну на підставі кількісного розрахунку необхідних компонентів шихти значно складніша ніж регулювання хімічного складу розплаву чавуну, який коригують за результатами контролю вмісту хімічних елементів у металі відібраної з розплаву проби. За таких умов набір матеріалів (феросплавів, карбюризаторів), які використовують для регулювання вмісту хімічних елементів у чавуні, є заздалегідь відомим. Тобто умови для вирішення задачі забезпечення заданого вмісту хімічного складу розплаву чавуну є повністю визначеними і саму задачу можна кваліфікувати як задачу з повною інформацією.

Визначення шихти для виплавлення чавуну заданого хімічного складу є задачею з неповною вхідною (початковою) інформацією. Насамперед невизначеність стосується основного компоненту шихти – металобрухту, його хімічного складу, забрудненості, вмісту в ньому шлаку, окалини тощо. На практиці насипна вага сталевго брухту складає  $(0,35...0,5) \text{ т/м}^3$ . По-друге, невизначеність задачі пов'язана з технологією плавки [86, с. 28–29].

Результати виконаних досліджень засвідчили, що на сучасних ливарних заводах, наприклад на ТОВ «М-ЛИТ», технологія виробництва чавуну передбачає повне зливання розплаву з 3-хтонної індукційної тигельної печі. На заводі шихта для виплавлення чавуну складається з (приблизно) 1 т звороту власного виробництва, 2 т сталевого брухту, 85 кг карбюризатора (бою електродів), 65 кг феросиліцію ФС65 і 22 кг феромарганцю ФМн78. При конкретизації, уточненні складу шихти відносно її орієнтовного складу задача постає у врахуванні непостійності вмісту хімічних елементів в металобрухті, карбюризаторі, феросплавах та обсягів їх угару в процесі плавки [9, 13, 24 та ін.].

Хімічний склад феромарганцю визначено стандартом України ДСТУ 3547-97, феросиліцію ДСТУ 4127:2002. При виплавленні в індукційних тигельних печах чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок і «клину Ханіна», використовують зазвичай феросиліцій ФС65 і феромарганець ФМн78. В таблиці 2.1 показано вимоги до хімічного складу феросиліцію ФС65 відповідно до ДСТУ 4127:2002 та хімічний склад трьох партій-плавки феросиліцію цієї марки, який вироблено на одному з феросплавних заводів України.

Таблиця 2.1

Масова частка елементів у складі феросиліцію ФС65,  
не більше, мас.%,

Елементи	<i>Si</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	<i>Al</i>	<i>Mn</i>	<i>Cr</i>	<i>Fe</i>
ДСТУ 4127:2002	63...68	0,2	0,02	0,05	2,5	0,5	0,5	–
1	68	0,03	0,01	0,04	1,0	0,2	0,2	29
2	65	0,05	0,01	0,04	1,5	0,3	0,2	32
3	63	0,20	0,02	0,05	2,5	0,5	0,5	33

**Примітка:** Згідно з ДСТУ 4127:2002 вміст *Si* складає від 63 до 68 % включно; *Fe* – все інше. Цифрами 1, 2, 3 позначено партії-плавки феросиліцію.

Дані таблиці 2.1 свідчать, що вміст вуглецю, сірки, фосфору в феросиліції не буде суттєво впливати на хімічний склад чавуну, який



виплавляється. Вміст марганцю також має той самий порядок, що й його вміст у чавуні, призначеному для виготовлення, зокрема, гальмових колодок типу «М» та «клину Ханіна» рухомого складу залізниці [15]. Але враховуючи, що частка феросиліцію в шихті для виплавлення чавуну є відносно невеликою  $\sim (2...3) \%$ , то на першому етапі підготовки шихти достатньо орієнтуватися на середні значення вмісту  $Mn$  у складі феросиліцію. В той самий час, діапазон розкиду значень вмісту кремнію у складі феросиліцію є суттєвим порівняно з середнім значенням його вмісту. Судячи із даних таблиці 2.1, при виробництві феросиліцію в промисловості, діапазон розподілу величин вмісту кремнію використовується повною мірою. Саме тому при удосконаленні методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну бажано і доцільно враховувати нестабільність вмісту кремнію у феросиліції.

В таблиці 2.2 надано інформацію відносно вимог ДСТУ 3547-97 до хімічного складу феромарганцю електролітичного високовуглецевого ФМн78 та трьох партій – плавок цього сплаву промислового виробництва.

Таблиця 2.2

Масові частки елементів у складі феромарганцю ФМн78,

не більше, мас.,%

Елементи	$Mn$	$C$	$Si$	$P$		$S$	$Fe$
				А	Б		
ДСТУ 3547-97	75...82	7,0	6,0	0,05	0,70	0,03	–
1	81	6,0	0,5	0,55		0,02	11
2	77	6,5	1,0	0,6		0,02	14
3	75	5,5	4,5	0,7		0,02	14

**Примітка:** Згідно з ДСТУ 3547-97 вміст  $Mn$  складає понад 75 до 82 % включно;  $Fe$  – інше. Цифрами 1, 2, 3 позначено партії-плавки феромарганцю.

Згідно з даними таблиць 2.1 і 2.2 вміст сірки у складі феросиліцію ФС65 і феромарганцю ФМн78 не є загрозливим з позицій якості чавуну і виробів з нього. Вимоги ДСТУ 3547-97 до вмісту фосфору (не більше 0,7 мас.,%) відповідають діапазону (0,4...0,9) %, передбаченому ГОСТ 30249-97

на чавун для гальмівних колодок типу «М». Тому при визначенні складу шихти для виплавлення такого чавуну достатньо орієнтуватися на результати контролю вмісту фосфору та інших хімічних елементів у складі чавуну конкретної плавки – партії або приймати за точку «прицілювання» граничне значення 0,7 % вмісту  $P$  згідно з ДСТУ (таблиця 2.2).

Величини вмісту  $Mn$ ,  $C$ ,  $Si$  мають широкі діапазони розподілу і це треба враховувати при формуванні складу шихти. Варто зазначити, що ДСТУ 3547-97 не обмежує у складі феромарганцю вміст  $C$  і  $Si$  мінімально допустимими величинами. Відповідно з метою посилення точності визначення обсягів (маси)  $Mn$ ,  $C$ ,  $Si$  при формуванні шихти для виплавлення чавуну необхідно враховувати в ймовірнісному підході параметри розподілу вмісту цих елементів у феросплавах.

Результати виконаних досліджень, висловлені аргументи і досвід ливарних підприємств дозволяють рекомендувати зокрема для виплавлення синтетичного чавуну, призначеного для виготовлення гальмових колодок типу «М» згідно з вимогами ГОСТ 30249-97 (вміст елементів, %:  $C = 2,7...3,4$ ;  $Si = 0,7...1,0$ ;  $Mn = 0,4...0,9$ ;  $P = 0,4...0,9$ ;  $S$  – не більше 0,20) наступний, орієнтовний у першому наближенні (прицілюванні), склад шихти. Так, залишок розплаву в печі («болото») плюс зворот власного виробництва мають дорівнювати  $\sim (30...35)\%$  в обсязі шихти; сталевий брухт (60...65)%; карбюризатори (2,5...3,0)%; феросиліцій ФС65 (2,0...2,5)%; феромарганець ФМн78  $\sim 1\%$ .

«Болото» у печі, як і зворот власного виробництва, вважаються матеріалами із відомим хімічним складом. Карбюризатор, необхідний для науглецьовування розплаву при плавленні чавуну в індукційних тигельних печах, в шихті має бути не менше (2,5...3,0) %, враховуючи його угар і відносно повільне засвоювання в розплаві. В разі виробництва чавуну за технологією з повним зливом розплаву, то (30...35) % в шихті складає зворот власного виробництва і цей зворот необхідно завантажувати у піч в першу чергу. Карбюризатор подавати вже у розплавлений метал. У зв'язку з тим, що

науглецювання чавуну шляхом внесення карбюризатора в розплав утруднено, то вміст карбюризатора в шихті слід підтримувати на верхній межі, а саме на рівні  $\sim 3\%$ . Ще раз підкреслимо, що карбюризатор завантажується у розплав в першу чергу. Також відзначимо, що засвоєння карбюризатора (бою електродів) дорівнює  $(90\ldots 95)\%$ , а швидкість його засвоєння у розплаві  $(0,1\ldots 0,13)_{\text{мас.}} \text{ \%/хв}$  [9].

На відміну від процедури регулювання складу чавуну на підставі результатів хімічного аналізу проби металу, відібраної безпосередньо з розплаву, коли відомо скільки бракує вмісту конкретного елемента в чавуні, то при корекції складу шихти за вхідну інформацію щодо *Mn* і *Si* слід приймати вимоги стандарту до вмісту цих елементів у продукції, яка буде виготовлятися з виплавленого чавуну.

## **2.2. Методика визначення залежності твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності.**

В металургії, машинобудуванні, ливарному виробництві, інших галузях промисловості використання вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності чавуну для характеристики його хімічного складу і властивостей ливарних виробів поширюється. Аналізу залежності механічних властивостей і експлуатаційних характеристик деталей, виготовлених литвом, присвячено багато досліджень, результати яких опубліковано в монографіях, статтях, тезах доповідей, патентах тощо [6–8, 25, 41, 45, 46, 48, 49, 51, 54, 55, 57, 86, 87 та ін.]. Проте, враховуючи певні досягнення у розв'язанні наукових і технологічних проблем в цій темі, слід зазначити, що не всі задачі ще глибоко вивчені і, головне, багато прогресивних рішень не доведено до виробничої практики. Тому дослідження у напрямі розширення використання вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну для прогнозування властивостей виливків залишаються вельми актуальними. Незважаючи на розповсюдження вуглецевого еквівалента в якості узагальнюючого показника хімічного

складу чавуну, а також властивостей чавунних виробів, значення вуглецевого еквівалента, особливості та межі його використання в дослідженнях і промисловій практиці потребують подальшого визначення.

В останні роки, у зв'язку з корінною модернізацією ливарного виробництва на багатьох підприємствах і поширенням виплавки чавуну в електричних індукційних печах замість використання вагранок [4, 88], посилилися можливості тонкого регулювання його хімічного складу. Відповідно активізувався інтерес науковців і виробничників до використання вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну для характеристики якості ливарних виробів. Показовим прикладом у цьому може бути практика регламентації в стандартах, технічних умовах, іншій нормативно-технологічній документації хімічного складу матеріалів для виготовлення ливарних виробів відповідального призначення, зокрема чавунних гальмівних колодок для залізничного транспорту. В стандартах на цю продукцію детально регламентується не тільки вміст хімічних елементів у складі чавуну, а й його мікроструктура.

Нині в Україні діє Національний стандарт ДСТУ 8833:2019 «Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом (загальні технічні умови)», який включає марки чавуну з ГОСТ 1412 та додатково вводить ще одну марку чавуну СЧА400.

Хімічний склад чавуну з пластинчастим графітом, рекомендований в ДСТУ 8833:2019, представлено в таблиці 2.3.

Марки чавуну, що наведені в табл. 2.3, найбільшою мірою відрізняються вмістом вуглецю і кремнію. При цьому з переходом від СЧ100 до СЧА400 масові частки С і Si у складі чавуну зменшуються, частка Mn (мас., %) збільшується від 0,5...0,8 у чавунах СЧ100, СЧ150, СЧА400 до 0,7...1,0 у СЧ200, СЧ300 і до 0,7...1,1 у чавуні СЧ350. Границі (не більше ніж) вмісту фосфору майже не змінюються. Допустиме значення (не більше ніж) сірки зменшується при підвищенні мінімальної границі міцності чавуну в литому стані.

Таблиця 2.3

Рекомендований хімічний склад чавуну з пластинчастим графітом відповідно  
ДСТУ 8833:2019

Марки чавуну	Масові частки елементів, %				
	C	Si	Mn	P	S
				не більше ніж	
СЧ100	3,5...3,7	2,2...2,6	0,5...0,8	0,3	0,15
СЧ150	3,5...3,7	2,0...2,4	0,5...0,8	0,2	0,15
СЧ200	3,3...3,5	1,4...2,4	0,7...1,0	0,2	0,15
СЧ250	3,2...3,4	1,4...2,2	0,7...1,0	0,2	0,15
СЧ300	3,0...3,2	1,3...1,9	0,7...1,0	0,2	0,12
СЧ350	2,9...3,0	1,2...1,5	0,7...1,1	0,2	0,12
СЧА400	2,7...2,9	1,3...1,6	0,5...0,8	0,1	0,10

Зазначена інформація є недостатньою для більш розширених висновків щодо зв'язку твердості та інших властивостей чавуну з масовими частками елементів у його складі. Тому для посилення інформативності даних таблиці 2.3 проаналізуємо зв'язки фізичних і механічних властивостей чавуну з вуглецевим еквівалентом і ступенем евтектичності його хімічного складу.

Вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$  хімічного складу чавуну розраховували за формулою (2.3)  $C_{\text{екв}} = C + 0,3Si + 0,33P - 0,15Mn + 0,26S$ , використовуючи наведені в таблиці 2.2 дані щодо масової частки (%) елементів у чавуні. Як вже зазначалося вище, при визначенні максимальної величини вуглецевого еквівалента  $C_{\text{еквmax}}$  вміст  $Mn$  приймали мінімальним, оскільки його вплив на величину  $C_{\text{екв}}$  згідно з формулою (1.3) негативний. При визначенні мінімальної величини  $C_{\text{еквmin}}$  вміст  $Mn$  приймали максимальним. Формула (1.3) була застосована як така, що часто використовується в подібних дослідженнях. В наших роботах [55, 41, 86] і розділі 1 даної дисертації показано, що усі відомі формули для розрахунку  $C_{\text{екв}}$  чавунів дають близькі результати.

Ступінь евтектичності чавуну, яка значною мірою визначає ливарні характеристики чавуну і механічні властивості чавунних виробів [25, 49, 54, 55 та ін.], розраховували за формулою (1.6):  $S_{\text{евт}} = C/[4,26 - 0,3(Si + P)]$ ,

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

В роботі [55] і розділі 1.2 даної дисертації розглянуті різні формули для розрахунку  $S_{\text{евт}}$  чавуну. Показано, що коефіцієнти перед значеннями вмісту хімічних елементів у складі чавуну в усіх відомих формулах приблизно однакові.

Результати розрахунків величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну з пластинчастим графітом різних марок представлені в таблиці 2.4 разом із показниками їх твердості і коефіцієнта теплопровідності. Твердість є одним із індикаторів фрикційних характеристик чавуну [5, 89 та ін.], зокрема чавунних гальмівних колодок залізничного транспорту. Значення коефіцієнта теплопровідності чавунів в таблиці 2.4 вказують на те, що матеріал чавунних вставок в гальмівних колодках з композиційного матеріалу, які застосовують для покращення відводу тепла із зони контакту колодки з колесом залізничного транспорту, впливає на температурний режим у цій зоні. Залежність коефіцієнта теплопровідності чавуну від його хімічного складу має враховуватися при виборі марки чавуну для колодок.

В роботах [55, 86] на підставі матеріалів досліджень хімічного складу і властивостей чавуну, з якого виготовляють гальмівні колодки, рекомендовано для посилення інформативності показників якості зазначених та інших ливарних виробів використовувати ймовірнісний підхід, метод Монте-Карло і статистичні параметри розподілів величин вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності. В таблиці 2.4 наведені дані щодо середніх значень, середніх квадратичних відхилень і коефіцієнтів варіації величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавунів, хімічний склад яких наведено в таблиці 2.3. Розрахунки виконали з використанням методу Монте-Карло і припущенням, що розподіл вмісту кожного елемента в

межах допустимого діапазону його величин відповідає нормальному закону Гаусса.

Таблиця 2.4

Показники вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , твердості НВ, коефіцієнта теплопровідності чавунів з пластинчастим графітом згідно з ДСТУ 8833:2019

Марка чавуну	СЧА400	СЧ350	СЧ300	СЧ250	СЧ200	СЧ150	СЧ100
$C_{\text{екв}_{\min}}$ , %	3,03	3,19	3,34	3,58	3,68	4,09	4,18
$C_{\text{екв}_{\max}}$ , %	3,36	3,44	3,76	4,06	4,22	4,45	4,54
Твердість НВ, не більш ніж	$\frac{245}{285}$	$\frac{229}{270}$	$\frac{197}{250}$	$\frac{187}{238}$	$\frac{170}{216}$	$\frac{163}{201}$	$\frac{156}{185}$
Коефіцієнт теплопровідності, $\lambda$ , за 20 °С, Вт/(м · К)	38	42	46	50	54	59	60
$\bar{C}_{\text{екв}_i}$ , %	3,20	3,22	3,33	3,90	3,94	4,14	4,25
$\sigma_{C_{\text{екв}_i}}$ , %	0,098	0,052	0,099	0,103	0,099	0,103	0,105
$Va_{C_{\text{екв}_i}}$	0,031	0,016	0,030	0,026	0,025	0,029	0,025
$\bar{S}_{\text{евт}_i}$	0,741	0,759	0,813	0,897	0,929	0,975	0,976
$\sigma_{S_{\text{евт}_i}}$	0,026	0,013	0,026	0,027	0,027	0,027	0,026
$Va_{S_{\text{евт}_i}}$	0,035	0,017	0,032	0,030	0,029	0,028	0,027

**Примітка.** Позначено:  $\bar{C}_{\text{екв}_i}$ ,  $\bar{S}_{\text{евт}_i}$  – середні величини вуглецевого еквіваленту і ступеня евтектичності чавунів, розрахованих ймовірнісним методом Монте-Карло;  $\sigma_{C_{\text{екв}_i}}$ ,  $\sigma_{S_{\text{евт}_i}}$  – середні квадратичні відхилення;  $Va_{C_{\text{екв}_i}}$ ,  $Va_{S_{\text{евт}_i}}$  – коефіцієнти варіації цих показників,  $Va_{C_{\text{екв}_i}} = \frac{\sigma_{C_{\text{екв}_i}}}{\bar{C}_{\text{екв}_i}}$ ,  $Va_{S_{\text{евт}_i}} = \frac{\sigma_{S_{\text{евт}_i}}}{\bar{S}_{\text{евт}_i}}$ . Кількість варіантів розрахунків методом Монте-Карло кожного показника складала 1000. В чисельнику – твердість НВ чавуну при товщині вилівка не більше 50 мм; в знаменнику – при товщині не більше 30 мм.

Результати, наведені в табл. 2.4, свідчать, що максимальні величини і мінімальні величини вуглецевого еквівалента, розрахованого за формулою (1.3) для чавунів різних марок суттєво різняться. Наприклад, для чавуну СЧ100 маємо  $C_{\text{екв}_{\max}} = 4,543$ , для СЧ350 –  $C_{\text{екв}_{\max}} = 3,4422$  і  $C_{\text{екв}_{\min}} = 3,1922$  відсотків. Діапазон можливих значень вуглецевого еквівалента чавунів, передбачених у ДСТУ 8833:2019, згідно з їх хімічним складом вельми

широкий – від 3,1922 до 4,543. За такої умови твердість НВ чавуну СЧ100 при товщині 50 мм в стінках виливків має складати не більше 156, чавуну СЧ350 – не більше 229. При цьому для чавуну СЧ350 коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  дорівнює 42 Вт/(м·К), для СЧ100 – 60 Вт/(м·К) (табл. 2.4).

Відповідно у технічних умовах на гальмівні колодки композиційні з чавунними вставками апріорі передбачена можливість і допустимість високої нестабільності фізичних і механічних властивостей та експлуатаційних характеристик (твердості, коефіцієнта тертя, зносостійкості) чавунних з пластинчастим графітом вставок й зазначених колодок в цілому. Акцентуємо увагу, що твердість і коефіцієнти теплопровідності, зокрема чавунів СЧ100 і СЧ350 різняться приблизно у півтори рази (табл. 2.4). Саме тому чавунні вставки у фрикційному матеріалі композиційних гальмівних колодок передбачені для покращення відводу тепла від колодок з метою підвищення їх зносостійкості й стабільності коефіцієнтів тертя колодок по робочій поверхні коліс під час гальмування рухомих засобів.

Аналіз даних, наведених у табл. 2.4, призводить ще до ряду додаткових висновків і коментарів. Так, у виробничій практиці ливарні вироби з чавуну, в тому числі чавунні гальмівні колодки чи чавунні вставки до гальмівних колодок з композиційного матеріалу (гумосуміші), мають конкретний, однозначний вміст кожного елемента у хімічному складі. Тому вуглецевий еквівалент хімічного складу чавуну, з якого виготовлено конкретні вироби, деталі, визначається однією конкретною величиною. Аналогічний висновок відноситься й до ступеня евтектичності чавуну. Визначені методами статистики діапазони розкиду вмісту хімічних елементів у складі чавуну, його хімічного еквівалента чи ступеня евтектичності характеризують стабільність цих показників в межах партії (партій) однакових ливарних виробів [41, 47, 57]. Стандарти, зокрема ДСТУ 8833:2019, в яких регламентовано допустимі діапазони, максимальні і мінімальні величини вмісту хімічних елементів у чавуні (табл. 2.3), фактично визначають діапазони і мінімальні, максимальні значення вуглецевого еквівалента та



ступеня евтектичності чавуну (табл. 2.4). Але реально в практичній діяльності ливарних підприємств вміст кожного хімічного елемента у складі чавуну є величиною випадковою і незалежною від вмісту інших елементів в межах діапазонів, окреслених в стандартах [41]. Реальні статистичні показники і діапазони розкиду величин  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$  можна отримати лише в результаті їх розрахунку при ймовірнісному підході до вибору величини вмісту кожного елемента із визначених стандартом діапазонів (табл. 2.4). Прийняття в першому наближенні гіпотези, що розподіл вмісту елементів підпорядковується закону Гаусса, слід вважати правомірним, оскільки ніяких застережень з цього приводу в стандартах на продукцію, що розглядається, не наведено.

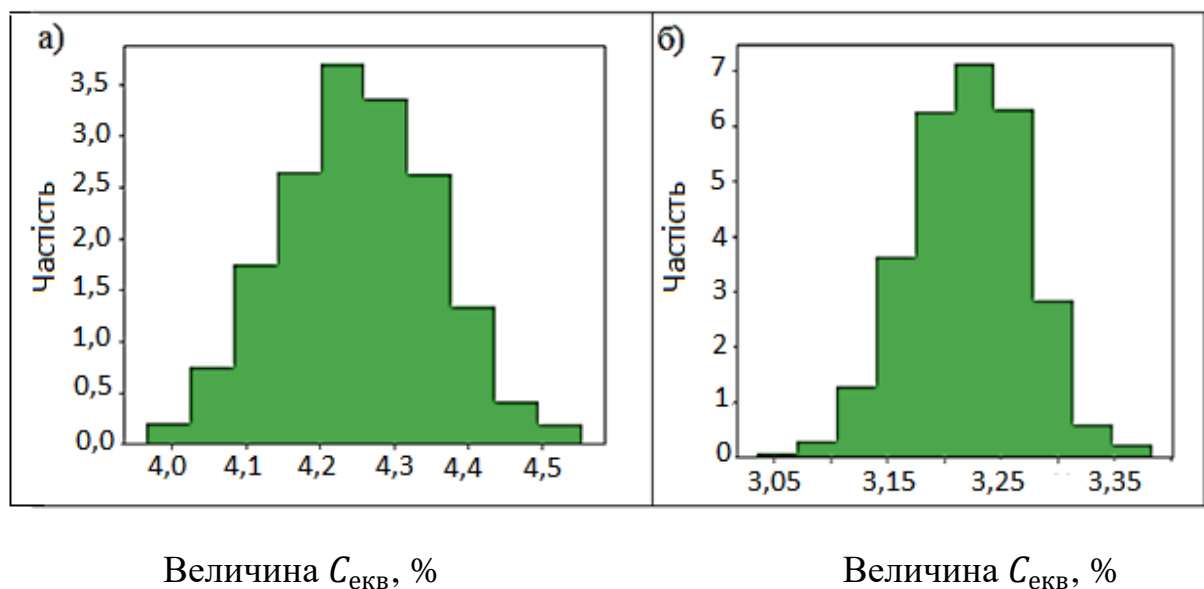


Рис. 2.1. Гістограми розподілу величин вуглецевого еквіваленту у чавунах марок СЧ100 і СЧ350, розраховані методом Монте-Карло для вмісту хімічних елементів у чавунах, передбачених у ДСТУ 8833:2019 (табл. 2.2). Кількість варіантів хімічного складу кожного чавуну при розрахунках параметрів їх розподілів дорівнювало 1000. Позначено: а) – СЧ100; б) – СЧ 350

Згідно з даними таблиці 2.4 середні значення  $\bar{C}_{\text{екв}_i}$  вуглецевого еквівалента, розраховані методом Монте-Карло, суворо кажучи, не співпадають з серединою діапазонів від  $C_{\text{екв}_{\min}}$  до  $C_{\text{екв}_{\max}}$ . Але ця різниця

незначна. Якщо вважати, що можливий діапазон розкиду  $C_{\text{екв}}$  дорівнює шести величинам середнього квадратичного відхилення  $6\sigma_{C_{\text{екв}i}}$ , то цей діапазон  $C_{\text{екв}}$  дещо ширший, ніж різниця між  $C_{\text{екв}max}$  і  $C_{\text{екв}min}$ . Найменший коефіцієнт варіації  $Va_{C_{\text{екв}i}}$  має чавун СЧ350. До речі, чавун марки СЧ350 згідно із ДСТУ 8833:2019 передбачає менший діапазон твердості НВ (від 229 до 270), ніж чавуни марок СЧ300, СЧ250, СЧ200. Гістограми розподілу величин вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну марок СЧ100 і СЧ350, розрахованих з використанням методу Монте-Карло для умов випадкових значень вмісту  $C, Si, Mn, P, S$  в межах діапазонів цих елементів у складі чавуну, представлені на рис. 2.1. Гістограми на цьому рисунку наочно ілюструють результати розрахунків, наведених у таблиці 2.4.

На рис. 2.2 представлено залежності твердості НВ і коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda$ , за 20 °С, Вт/(м · К) чавунів марок СЧ100...СЧА400 від їх вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , розрахованого за даними хімічного складу пластинчастого чавуну згідно з ДСТУ 8833:2019 (табл. 2.3 і 2.4). Як бачимо, при збільшенні величини  $C_{\text{екв}}$  твердість НВ чавуну монотонно зменшується. В той же час важливо зазначити, що однакову твердість можуть мати виливки з однією товщиною стінки, але при суттєвій різниці між мінімальною  $C_{\text{екв}min}$  і максимальною  $C_{\text{екв}max}$  величинами вуглецевого еквівалента. Інакше кажучи, твердість НВ чавунів може суттєво різнитися при однаковому вуглецевому еквіваленті їх хімічного складу. Ці дані корелюють з висновками досліджень, наведених в наших статтях [41, 55, 86 та ін.] та публікаціях інших авторів, в яких стверджується, що у вузькому діапазоні розкиду величин  $C_{\text{екв}}$  залежність твердості НВ від  $C_{\text{екв}}$ , як правило, не проявляється. Але відповідно до ДСТУ 8833:2019 тенденція зменшення твердості НВ чавуну при збільшенні вуглецевого еквівалента його хімічного складу (рис. 2.2) [86].

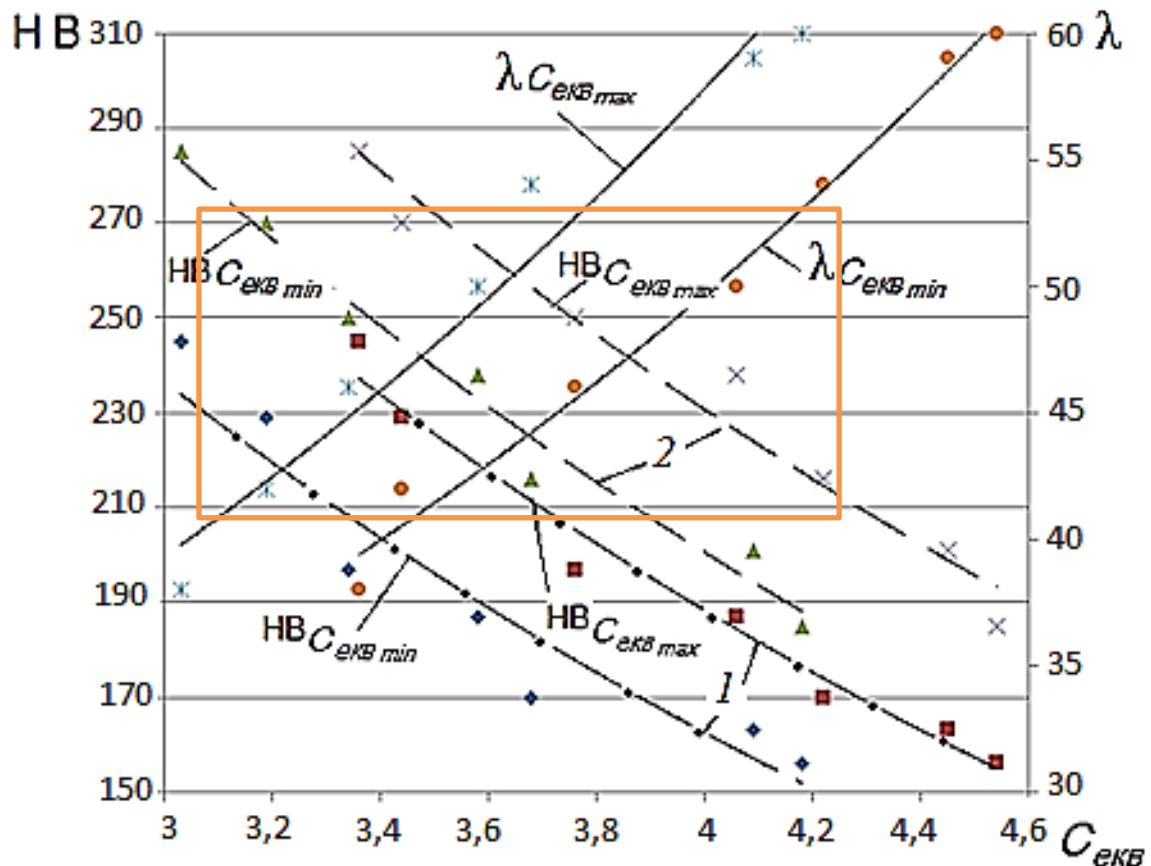


Рис. 2.2. Залежність твердості НВ і коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda$ , за  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  чавунів СЧ100...СЧА400 від їх вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , %. Позначено:  $C_{\text{екв}_{\text{max}}}$  – при максимальному значенні вуглецевого еквівалента;  $C_{\text{екв}_{\text{min}}}$  – при мінімальному; цифрою 1 – величини твердості НВ при товщині стінки виливка не більше 50 мм; цифрою 2 – при товщині не більше 30 мм;  $\blacklozenge$  і  $\blacktriangle$  – твердість НВ відносно  $C_{\text{екв}_{\text{min}}}$ ;  $\blacksquare$  і  $\times$  – відносно  $C_{\text{екв}_{\text{max}}}$ ;  $*$  і  $\bullet$  –  $\lambda$  відносно  $C_{\text{екв}_{\text{max}}}$  і  $C_{\text{екв}_{\text{min}}}$ .

На рис.2.2 показано, що коефіцієнт теплопровідності  $\lambda$  збільшується при підвищенні величини вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну. Вище було відмічено, що за рахунок оснащення чавунними вставками гальмівних композиційних колодок їх виробники намагаються знизити температуру в зоні контакту гальмівних колодок з колесами транспортних засобів. Криві  $\lambda(C_{\text{екв}})$  на рис.2.2 показують, що теплопровідність чавуну з пластинчастим графітом сильно залежить від його вуглецевого еквівалента.

В технічній літературі публікацій щодо результатів досліджень ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  чавунів на їх властивості значно менше, ніж статей, присвячених вуглецевому еквівалента чавунів. По відношенню до чавунів з пластинчастим графітом і чавунів, призначених для виготовлення ливарних виробів, поширена точка зору, що ступінь евтектичності чавунів визначає їх механічні властивості [46, 55 та ін.]. Результатами статистичних досліджень ступеня евтектичності чавунів з пластинчастим графітом марок СЧ100...СЧА400 згідно з ДСТУ 8833:2019, виконаних із застосуванням ймовірнісного підходу і представлених в табл.2.4. Показано, що при хімічному складі чавунів зазначених марок (табл.2.3) середні значення ступеня їх евтектичності знаходяться в діапазоні 0,741...0,976, середнє квадратичне відхилення дорівнює 0,026...0,027 для чавунів усіх марок, окрім СЧ350. Коефіцієнт варіації – на тому ж рівні, як й коефіцієнт варіації вуглецевого еквівалента. При цьому середнє значення ступеня евтектичності, як й величини вуглецевого еквівалента, зменшується при переході від СЧ100 до СЧА400.

Гістограма розподілу величини ступеня евтектичності чавуну марки СЧ350 представлена на рис.2.3. Зазначена гістограма в цілому подібна наведеним на рис.2.1 гістограмам розподілу величин вуглецевого еквівалента. На рис.2.4 показано залежності середніх значень величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавунів СЧ100...СЧА400 від їх міцності при розтягуванні. Точки, наведені на рис.2.4, засвідчили, що міцність чавунів з пластинчастим графітом збільшується при зменшенні величин їх вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності. Наведені в таблицях і на рисунках дані щодо розподілу величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності хімічного складу чавунів з пластинчастим графітом надають інформацію, необхідну для вибору марки чавуну при виготовленні ливарної продукції відповідального призначення.

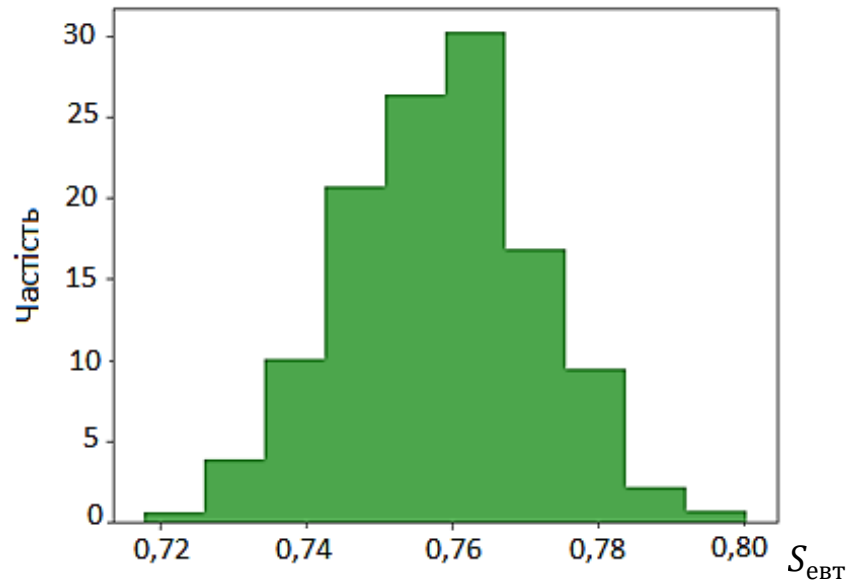


Рис. 2.3. Гістограма розподілу величини ступеня евтектичності чавуну марки СЧ350 згідно ДСТУ 8833:2019, хімічний склад якого представлено у табл.2.2. Кількість варіантів  $S_{\text{евт}}$  при розрахунках ймовірнісним методом Монте-Карло дорівнювало 1000.

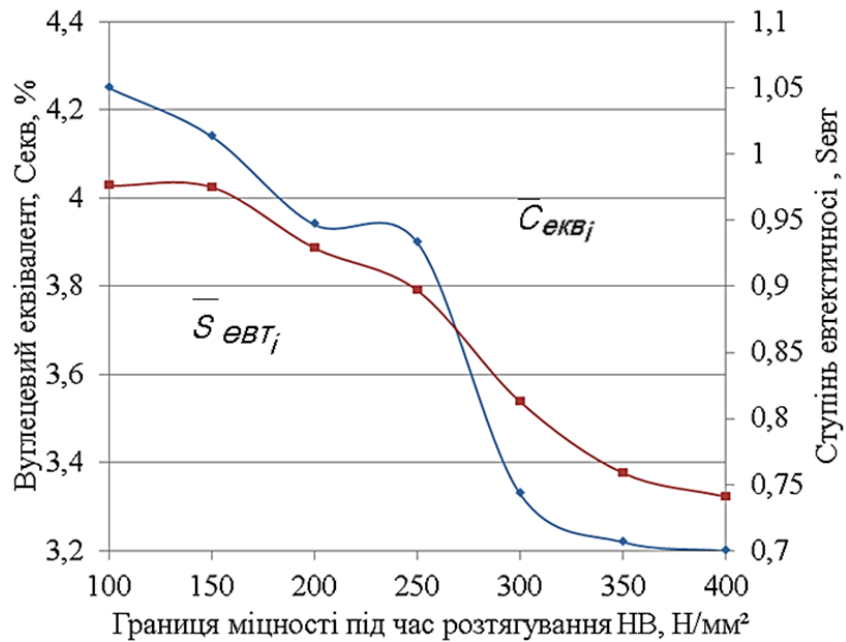


Рис. 2.4. Залежності середніх значень величин вуглецевого еквівалента  $\bar{C}_{\text{екв}}$  і ступеня евтектичності  $\bar{S}_{\text{евт}}$  чавунів з пластинчастим графітом (відповідно ДСТУ 8833:2019) від границі їх міцності при розтягуванні.

### 2.3. Методика прогнозування механічних властивостей і теплопровідності сірого чавуну.

У технічній літературі [2, 5, 25, 54, 51, 62 та ін.], акцентується увага на питанні залежності механічних властивостей, а саме міцності  $\sigma_B$ , твердості за Брінеллем  $HB$  чавунного литва від хімічного складу чавуну, з якого виготовлено ливарну продукцію, від вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  і ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  чавуну. У технічній літературі наведені емпіричні формули, що призначені для приблизних розрахунків значень механічних властивостей чавуну від  $C_{\text{екв}}$  та  $S_{\text{евт}}$ , що актуальні й нині. Але отримані раніше рішення, в умовах прогресу ливарного виробництва і методів математичного моделювання технологічних процесів у металургії та машинобудуванні, мають можливість розвитку та удосконалення.. Зазначене стосується і подальшого розвитку на сучасному науково-технічному рівні класичної задачі: хімічний склад – властивості залізовуглецевих сплавів, зокрема чавуну, у ливарному виробництві. Нові рішення мають змогу на практиці скоротити обсяг іспитів дослідних зразків готової ливарної продукції для контролю її механічних властивостей за рахунок впровадження більш надійного прогнозування. Запровадити неруйнівну систему контролю якості ливарної продукції.

Основний недолік відомих, експериментально визначених формул для розрахунків залежності механічних властивостей ливарних виробів з чавуну від показників його хімічного складу, зокрема від вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності полягає в тому, що у відомих формулах ніяк не враховується ймовірнісний характер цих показників у визначених стандартами діапазонах відсоткового вмісту хімічних елементів. Зазвичай невідомо яку величину конкретного показника (аргументу) необхідно застосовувати у розрахунках за формулами – мінімальну, максимальну, середню чи будь-яку іншу. Більше того, немає інформації про методику побудови регресійних рівнянь (формул) і які величини показників  $C_{\text{екв}}$ ,  $S_{\text{евт}}$  були використані. А це ключове питання в задачі, що розглядається.

У монографії [25, с. 154–155], наприклад, та інших роботах підкреслюється, що залежності механічних властивостей виливків можуть бути визначені через ступінь евтектичності або вуглецевий еквівалент хімічного складу чавуну. Показано, що з підвищенням ступеня евтектичності міцність і твердість чавуну знижуються. Зазначено, що для орієнтовного розрахунку використовують наступні емпіричні формули:

$$\sigma_B = 102 - 82,5S_{\text{евт}}; HB = 538 - 355S_{\text{евт}}, \quad (2.2)$$

де розмірність  $\sigma_B$  кгс/мм<sup>2</sup>.

В книзі [48] межі застосування формул (1) не вказано.

Автори монографії [48, с.155] вважають, що найкращі механічні властивості мають доевтектичні чавуни СЧ20...СЧ35 (згідно з маркуванням за ДСТУ 8833:2019 (за ГОСТ 1412-85, це відповідно СЧ200...СЧ350), які знайшли широке застосування для виготовлення складних і відповідальних виливків.

Емпіричні формули (2.3), що запропоновані у роботі [90–92], аналогічні формулі (2.2):

$$\sigma_{B_{\text{теор}}} = 100 - 80S_{\text{евт}}; HB_{\text{теор}} = 530 - 344S_{\text{евт}}, \quad (2.3)$$

де  $\sigma_{B_{\text{теор}}}$  і  $HB_{\text{теор}}$  – розраховані (теоретичні [59]) міцність чавуну при розтягуванні, кгс/мм<sup>2</sup>, та твердість за Брінеллем;  $S_{\text{евт}}$  – ступінь евтектичності чавуну.

У книзі [10, с. 26–27] запропоновано для характеристики залежностей механічних властивостей сірого чавуну від його хімічного складу розглянути формули Шнейдевінда і Мак-Елві (2.4) та В. Патерсона (2.5):

$$\sigma_B = 80,5 - 16,1lg \frac{T}{15} - 14C_{\text{екв}}, \quad HB = 100 - 4,3\sigma_B. \quad (2.4)$$

В книзі [60] не вказані розмірності змінних у цих формулах. Але за логікою викладання матеріалу схоже, що розмірність  $\sigma_B$  міцності чавуну на розрив, кгс/мм<sup>2</sup>; товщина  $T$  стінки виливка, мм;  $HB$  – твердість за Брінеллем. Величина вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  визначена за формулою:  $C_{\text{екв}} = C +$

$0,3(Si + P)$ , де  $C$ ,  $Si$ ,  $P$  – вміст вуглецю, кремнію і фосфору в сірому чавуні, мас.,%.

На механічні і ливарні властивості чавуну, особливо синтетичного, суттєво впливають не тільки його вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$  і ступінь евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , а й відношення  $C/Si$  відсоткового вмісту вуглецю до вмісту кремнію [11–12]. У довіднику [54, с. 133] наведено рівняння для модифікованого стану синтетичного чавуну:

$$\sigma_B = 96,5 - 70S_{\text{евт}} - 2,1C/Si, \quad (2.5)$$

де  $\sigma_B$ , кгс/мм<sup>2</sup>.

Проте слід звернути увагу, що змінні  $S_{\text{евт}}$  і  $C/Si$ , які знаходяться праворуч після знаку рівняння у формулі (2.6), корельовані між собою. Відносно сірого чавуну з пластинчастим графітом зазначене в дисертації обговорено окремо. Взагалі ж використання корельованих між собою змінних у подібних рівняннях небажано.

У статтях [11, 12, 55, 89 та ін.] величини вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  та відношення  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у складі чавуну розглянуто з позицій ймовірного підходу. Зазначено, що з цієї точки зору величини  $C_{\text{екв}}$ ,  $S_{\text{евт}}$ ,  $C/Si$  сірого чавуну можуть бути різними у партіях-плавках чавуну навіть при незмінних діапазонах відсоткового вмісту хімічних елементів у складі чавуну, визначених у стандартах на ливарну продукцію, що виготовляється. Але не виключено, що розраховані у ймовірнісному аспекті значення  $C_{\text{екв}}$ ,  $S_{\text{евт}}$ ,  $C/Si$  можуть бути однаковими за дещо різних величинах відсоткового вмісту хімічних елементів  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  у складі чавуну. Відповідно, визначення величин,  $S_{\text{евт}}$ ,  $C/Si$  у чавуні промислових партій і прогнозування його механічних властивостей має передбачати такі нюанси і базуватися на ймовірнісному підході, оскільки формування властивостей литва є багатовимірним випадковим процесом. Такий підхід до розгляду процесів



виготовлення литва з чавуну та інших сплавів представлено у загальному вигляді в книгах [10, с. 24–28; 13, с. 62–78].

Дисертація, як вже зазначалося вище, розвиває тему і напрям досліджень, результати яких викладені у роботах [9, 11, 12, 55, 89 та ін], щодо визначення у ймовірнісному підході величин показників хімічного складу чавуну, а саме вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення  $C/Si$ , і прогнозування на їх основі механічних властивостей сірого чавуну з пластинчастим графітом, який виплавляють згідно з умовами ДСТУ 8833:2019. Відповідно до рекомендацій, висловлених, зокрема, у книзі [10, с. 25], при проведенні даних досліджень вважали, що розподіл величин відсоткового вмісту хімічних елементів у чавуні в межах діапазонів, регламентованих у ДСТУ, відповідає розподілу за нормальним законом Гаусса.

Величини вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , відношення  $C/Si$  розраховували із застосуванням методу Монте-Карло.  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$  визначали за формулами (1.5), (1.6):  $C_{\text{екв}} = C + 0,3(Si + P)$ ,  $S_{\text{евт}} = C/[4,26 - 0,3(Si + P)]$ .

Сірий доевтектичний чавун з пластинчастим графітом було прийнято об'єктом досліджень тому, що, по-перше, чавуни такого класу протягом десятиліть знайшли широке застосування у промисловості для виготовлення ливарних виробів відповідального призначення [25, с. 155]. По-друге, наведені у ДСТУ 8833:2019 дані щодо хімічного складу (рекомендованого) і властивостей виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом різних марок ретельно і системно узагальнені та викликають довіру. Виходячи з цих міркувань, предметом дослідження було вибрано хімічний склад і властивості ливарних виробів саме із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальні технічні вимоги до виливків із такого чавуну представлені у ДСТУ 8833:2019. Методика дослідження була та, що й при виконанні досліджень, викладених у попередніх розділах дисертації та у публікаціях

[11–12, 55, 89]. Рекомендований хімічний склад чавуну з пластинчастим графітом згідно з ДСТУ 8833:2019 наведено у табл. 2.3.

В таблиці 2.4 наведені ймовірні величини вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  і відношення  $C/Si$  чавунів з пластинчастим графітом різних марок відповідно ДСТУ 8833:2019, розраховані методом Монте-Карло. Аналіз цих даних частково надано в тексті статей [65, 67]. У розвиток зазначеної інформації в таблиці 2.5 представлені величини  $\sigma_B$  (Н/мм<sup>2</sup>) границі міцності під час розтягування чавунів відповідно до вимог ДСТУ 8833:2019 (на величину мінімальної границі міцності  $\sigma_B$  у ДСТУ вказує цифрова позначка у марці чавуну) та відношення  $C/Si$  величин відсоткового вмісту вуглецю до вмісту кремнію.

Таблиця 2.5

Величини  $\sigma_B$  (не менше ніж), твердості  $HB$  (не більше ніж), вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , відношення  $C/Si$  середніх величин вмісту вуглецю  $C$  до кремнію  $Si$  чавунів різних марок, представлених у ДСТУ 8833:2019

$\sigma_B, \text{Н/мм}^2$	$HB50$	$HB30$	$C_{\text{екв}}, \%$	$S_{\text{евт}}$	$C/Si$
400	245	285	3,2	0,741	1,93
350	229	270	3,22	0,759	2,19
300	197	250	3,33	0,813	1,94
250	187	238	3,9	0,897	1,83
200	170	216	3,94	0,929	1,79
150	163	201	4,14	0,975	1,64
100	156	185	4,25	0,976	1,5

**Примітка.** Позначено:  $HB50$  – твердість при товщині стінки вилівка 50 мм;  $HB30$  – при товщині стінки 30 мм

У таблиці 2.6 відображено кореляційні зв'язки між показниками хімічного складу і механічними властивостями виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом, які виготовляють згідно з ДСТУ 8833:2019. У табл. 2.5 використані позначення, що й в табл. 2.4.

Таблиця 2.6

Матриця кореляційних зв'язків (коефіцієнтів) між механічними властивостями ( $\sigma_B$ ,  $HB$ ) і показниками ( $C_{\text{екв}}$ ,  $S_{\text{евт}}$ ,  $C/Si$ ) хімічного складу сірого чавуну з пластинчастим графітом

	$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	$HB50$	$HB30$	$C_{\text{екв}}$ , %	$S_{\text{евт}}$	$C/Si$
$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	1					
$HB50$	0,97288	1				
$HB30$	0,99878	0,97546	1			
$C_{\text{екв}}$ , %	-0,096206	-0,93359	-0,95447	1		
$S_{\text{евт}}$	-0,97751	-0,97392	-0,9753	0,98669	1	
$C/Si$	0,8789	0,82832	0,88096	-0,89601	-0,87995	1

Залежності границі міцності  $\sigma_B$ , Н/мм<sup>2</sup>, при розтягуванні та твердості  $HB$  для товщини стінки виливків 50 мм ( $HB50$ ) і 30 мм ( $HB30$ ) від вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  і відношення  $C/Si$ , розраховані з використанням ймовірнісного підходу при визначенні зазначених показників хімічного складу виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом представлені на рис. 2.6-2.11. Наведені також значення  $R^2$ , де  $R$  – коефіцієнти кореляції.

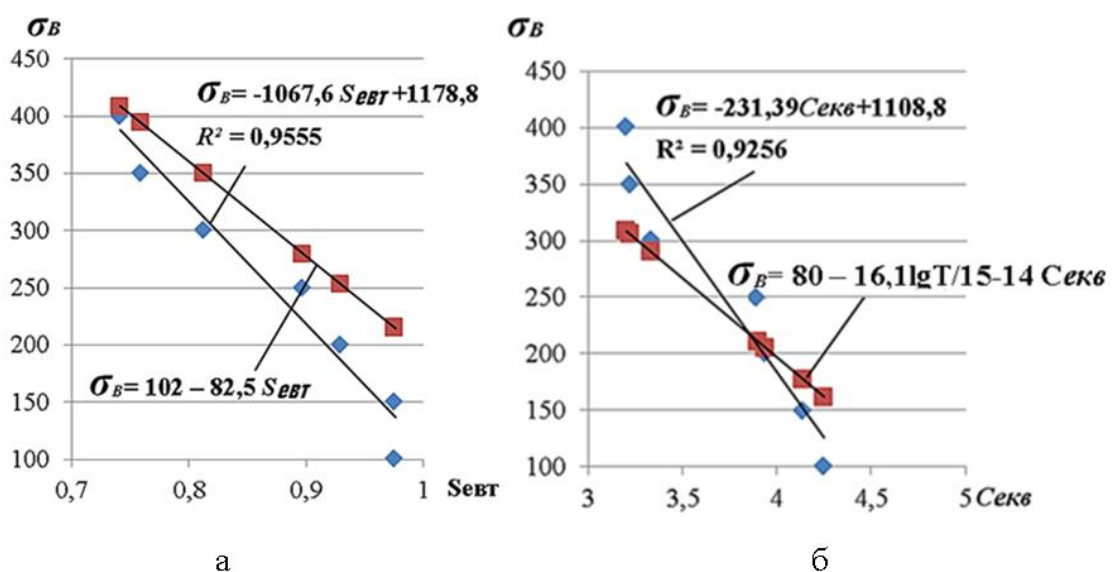


Рис. 2.6. Залежності границі міцності  $\sigma_B$ , Н/мм<sup>2</sup> (не менше ніж) від  $S_{\text{евт}}$  (а) і  $C_{\text{екв}}$ , %, (б) сірого чавуну з пластинчастим графітом.

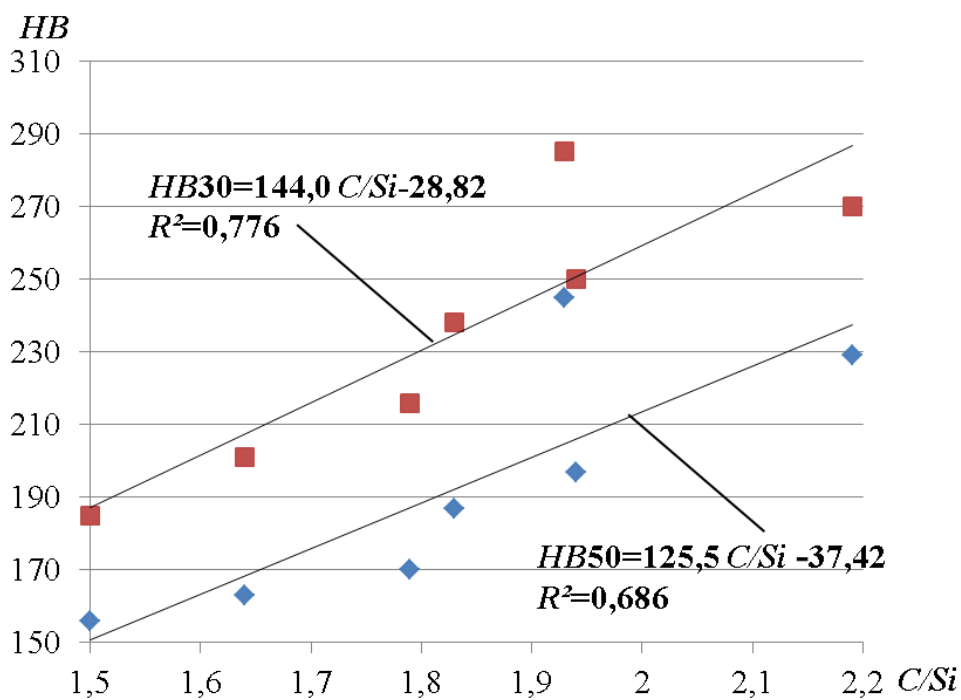


Рис. 2.7. Залежності твердості  $HB$  (не більше ніж) від середньої величини відношення  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у складі сірого чавуну з пластинчастим графітом

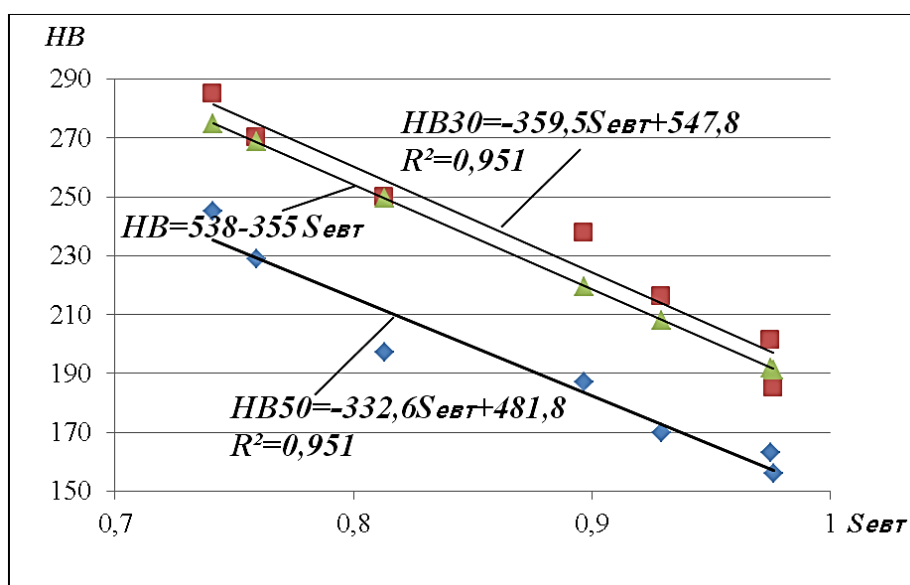


Рис. 2.8. Залежності твердості  $HB$  (не більше ніж) від середньої величини ступеня евтектичності  $S_{евт}$  сірого чавуну з пластинчастим графітом

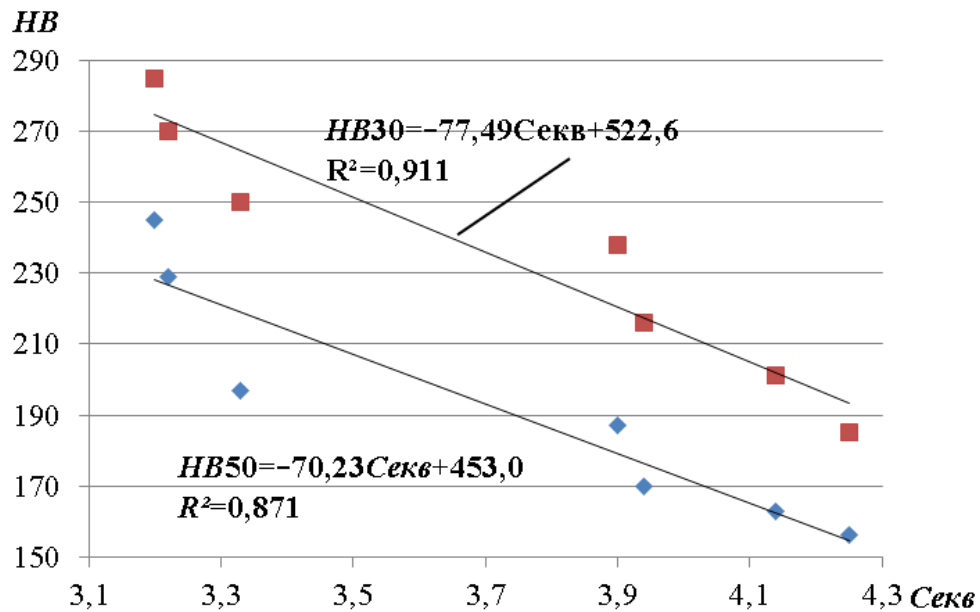


Рис. 2.9. Залежності твердості  $HB$  (не більше ніж) від середньої величини вуглецевого еквівалента  $C_{екв}$ , %, сірого чавуну з пластинчастим графітом

Залежності на рис. 2.6-2.11 в цілому адекватно відображають характер впливу показників  $C_{екв}$ ,  $S_{евт}$ ,  $C/Si$  хімічного складу сірого чавуну з пластинчастим графітом на його механічні властивості, а саме на  $\sigma_B$  і  $HB$ . Представлені на цих рисунках формули для розрахунку  $\sigma_B$  і  $HB$  виливків різної товщини в функції  $C_{екв}$ ,  $S_{евт}$ ,  $C/Si$  суттєво уточнюють аналогічні формули (2.2) – (2.5), перш за все, завдяки представленню в них змінних у ймовірнісному визначенні величин показників хімічного складу чавуну. Запропонований підхід і отриманні рішення доцільно запровадити у практичній діяльності ливарних підприємств при побудові формул для прогнозування якості литва відповідального призначення.

Окремого розгляду потребують залежності вуглецевого еквівалента  $C_{екв}$  і ступеня евтектичності  $S_{евт}$ , а також міцності  $\sigma_B$  при розтягуванні зразків сірого чавуну з пластинчастим графітом від відношення  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у його хімічному складі (рис. 2.7, 2.10, 2.11). Результати статистичних досліджень показників  $C_{екв}$ ,  $S_{евт}$ , відношення  $C/Si$  у

промислових партіях чавунних колодок типу «М» для залізничного транспорту, які виготовляють відповідно до вимог ГОСТ 30249-97, що представлені у попередніх розділах нашій роботі [10], не засвідчили кореляції  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$  з відношенням  $C/Si$ . Слід відмітити, що у досліджених промислових партіях гальмівних колодок і «клину Ханіна», який виготовляють згідно з вимогами ГОСТ 34503-2018, відсотковий вміст  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  чавуну змінювався у відносно вузьких інтервалах, визначених цими стандартами. Відповідно і величини  $C_{\text{екв}}$  та  $S_{\text{евт}}$ , які обумовлюються вмістом хімічних елементів у складі чавуну, також змінювались недостатньо широко для виявлення кореляційних зв'язків між механічними властивостями ливарних виробів і названими показниками хімічного складу чавуну. При тому, що нестабільність, коливання шуканих змінних були суттєвими.

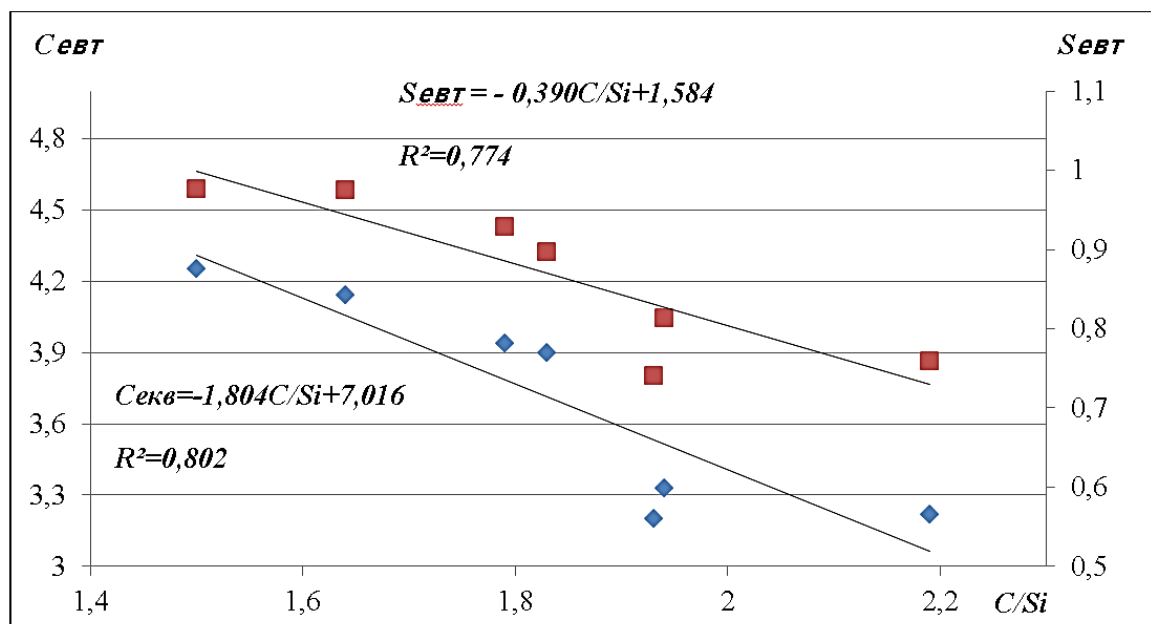


Рис. 2.10. Залежності вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , % і ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  сірого чавуну з пластинчастим графітом від відношення  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у його хімічному складі

Наведені у таблицях 2.5 і 2.6 та на рис. 2.7, 2.10 і 2.11 дані свідчать, що величини міцності  $\sigma_B$  (не менше), твердості  $HB$  (не більше), вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  і ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  сірого чавуну з пластинчастим

графітом, який виплавляють згідно з вимогами ДСТУ 8833:2019, корельовані з відношенням  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у його хімічному складі. З підвищенням відношення  $C/Si$  величини  $C_{екв}$  і  $S_{евт}$  зменшуються. Міцність  $\sigma_B$  і твердості  $HB$  виливків із сірого чавуну з хімічним складом за ДСТУ 8833:2019 збільшується при збільшенні відношення  $C/Si$ . Рівняння регресії, які відображають залежності  $C_{екв}(C/Si)$ ,  $S_{евт}(C/Si)$ ,  $\sigma_B(C/Si)$ , представлені на рис. 2.7, 2.10 і 2.11.

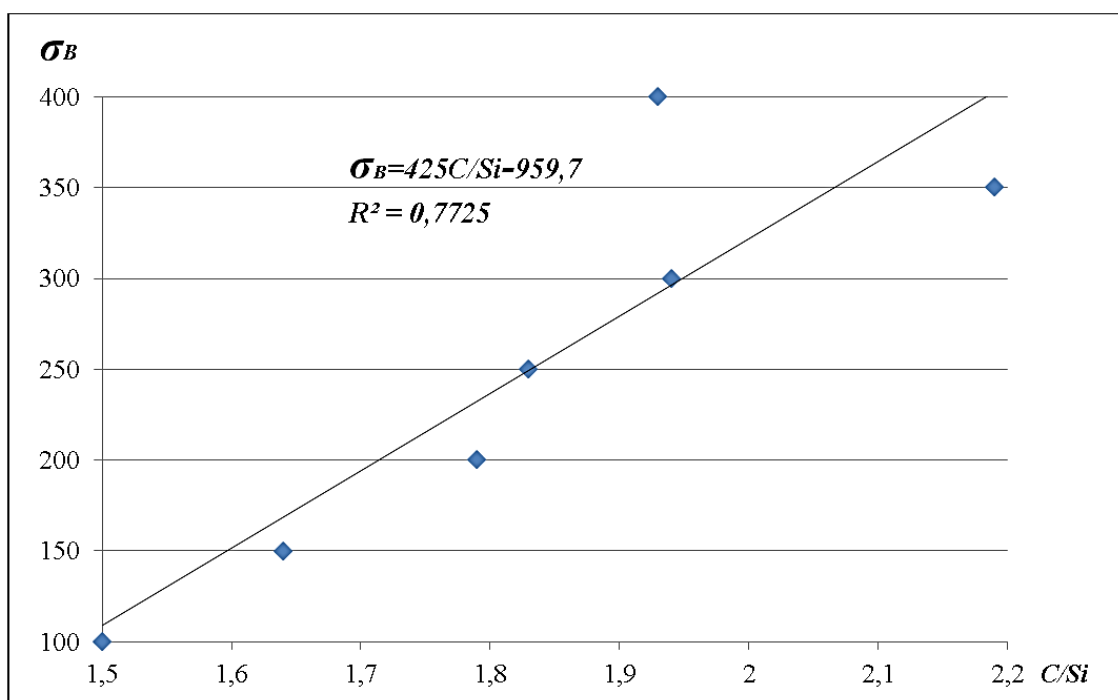


Рис. 2.11. Залежність границі міцності  $\sigma_B$ , Н/мм<sup>2</sup> (не менше) сірого чавуну з пластинчастим графітом від відношення  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у його хімічному складі.

Звертаємо особливу увагу: у формулі (2.5), наведеної у довіднику [54, с. 133] щодо синтетичного чавуну у модифікованому стані, знак «мінус» перед  $C/Si$  не відповідає позитивному характеру залежності  $\sigma_B$  від цього відношення (рис. 2.11). Підкреслюємо, що дані, які представлені у таблицях 2.5 і 2.6 та на рисунках, стосуються виключно виливків з сірого чавуну з

пластинчастим графітом, який виплавляють згідно з вимогами ДСТУ 8833:2019.

Співставлення залежностей  $\sigma_B (S_{\text{евт}})$ ,  $\sigma_B (C_{\text{екв}})$ ,  $HB (S_{\text{евт}})$ , наведених на рис. 2.6 і рис. 2.7, з формулами (2.2) – (2.5), призводить до наступних зауважень і пояснень. По-перше, лінії на рис. 2.6 зображені у розмірності Н/мм<sup>2</sup> щодо міцності  $\sigma_B$ . При цьому, лінія на рис. 2.6, яка побудована за формулою (2.4), стосується виливків товщиною  $T = 30$  мм. По-друге, лінії, які побудовані за формулами (2.2) і (2.4) та відображені на рис. 2.5 и рис. 2.7, слід розглядати у діапазонах  $S_{\text{евт}}$  і  $C_{\text{екв}}$ , визначених на цих рисунках. Характер функцій і ліній, розрахованих з використанням ймовірнісного підходу за формулами (2.2)–(2.4), відповідає уявленням щодо впливу ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  і вуглецевого  $C_{\text{екв}}$  на міцність сірого чавуну з пластинчастим графітом. Все зазначене свідчить, що формули (2.2)–(2.5) у першому наближенні, також можуть бути використані для орієнтовної оцінки властивостей чавунних виливків при достовірному визначенні величин  $S_{\text{евт}}$  і  $C_{\text{екв}}$ . Але значно надійніше користуватися запропонованими новими формулами (2.6) – (2.11), представленими на рисунках (2.15) – (2.14):  $\sigma_B = -231,39C_{\text{екв}} + 1108,8$  (2.6);  $\sigma_B = -1067,6S_{\text{евт}} + 1178,8$  (2.7);  $HB_{30} = -359,5S_{\text{евт}} + 547,8$  (2.8);  $HB_{50} = -332,6S_{\text{евт}} + 481,8$  (2.9);  $HB_{30} = -70,49C_{\text{екв}} + 522,6$  (2.10);  $HB_{50} = -70,23C_{\text{екв}} + 453,0$  (2.11).

Експлуатаційні характеристики ливарних виробів із сірого чавуну суттєво залежать не тільки від механічних властивостей ( $HB$  і  $\sigma_B$  та ін.), а й від його фізичних властивостей: температурного коефіцієнта лінійного розширення, теплоємності, теплопровідності тощо. Автори монографії [25, с.155-157], наприклад, підкреслюють, що важливим показником якості чавуну є його теплопровідність, яка обумовлює, зокрема, експлуатаційні характеристики ливарних виробів в умовах знакозмінних теплових навантажень. Таке твердження повною мірою стосується чавунних гальмівних колодок залізничного транспорту.



В таблиці 2.4 представлені величини коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  за 20°C, Вт/(м·К), ймовірні значення вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  і ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  чавунів з пластинчастим графітом. В доповнення до наведеної інформації в таблиці 2.7 представлені кореляційні зв'язки між показниками  $S_{\text{евт}}$  і  $C$  хімічного складу, твердості НВ і коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  виливків із сірого чавуну. Показано, що при збільшенні величин  $S_{\text{евт}}$  і  $C_{\text{екв}}$  теплопровідність чавуну з пластинчастим графітом збільшується.

Таблиця 2.7

Матриця кореляційних зв'язків між твердістю НВ, показниками хімічного складу чавуну з пластинчастим графітом  $S_{\text{евт}}$  і  $C_{\text{екв}}$ , % і коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda$  за 20°C, Вт/(м·К)

	НВ <sub>50</sub>	НВ <sub>30</sub>	$\lambda$	$S_{\text{евт}}$	$C_{\text{екв}}$
НВ <sub>50</sub>	1				
НВ <sub>30</sub>	0,975	1			
$\lambda$	-0,978	-0,994	1		
$S_{\text{евт}}$	-0,974	-0,975	0,978	1	
$C_{\text{екв}}$	-0,934	-0,94	0,964	0,987	1

Залежності коефіцієнта теплопровідності  $\lambda$  за 20°C, Вт/(м·К) чавуну з пластинчастим графітом від твердості НВ виливків з нього та ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$  і вуглецевого еквіваленту  $C_{\text{екв}}$ , мас.%, хімічного складу чавуну відображають формули:

$$\lambda = -0,228\text{НВ}_{30} + 103,5 \quad (2.12); \quad \lambda = -0,2428\text{НВ}_{50} + 96,52 \quad (2.13);$$

$$\lambda = 83,58S_{\text{евт}} - 22,86 \quad (2.14); \quad \lambda = 17,97 C_{\text{екв}} - 16,85 \quad (2.15).$$

Високі значення коефіцієнтів кореляції (табл.2.6) між змінними у запропонованих формулах (2.12) – (2.15)

підкреслюють їх придатність для використання при оцінках і прогнозуванні теплопровідності ливарних виробів із чавуну з пластинчастим графітом за показниками  $S_{\text{евт}}$  і  $C_{\text{екв}}$  його хімічного складу. Зазначені формули (2.12)-(2.15), та аналогічні формули (2.6)-(2.11), можна застосовувати і як інструмент позаруйнівної оцінки якості виливків з чавуну.

## Висновки до розділу 2.

Вуглецевий еквівалент є наочним узагальнюючим показником хімічного складу і властивостей чавунів в умовах варіації в них вмісту хімічних елементів у порівняно широких діапазонах. Запропоновано методологію визначення величини цього показника. Рекомендовано розраховувати вуглецевий еквівалент хімічного складу чавунів за однією з поширених формул – методом Монте-Карло, використовуючи ймовірнісний підхід при врахуванні вмісту кожного елемента у сплаві.

Показано, що діапазони вмісту хімічних елементів у складі чавуну з пластинчастим графітом марки СЧ350 згідно з вимогами ДСТУ 8833-2019 забезпечують мінімальні варіації вуглецевого еквівалента серед чавунів інших марок. Зазначене повною мірою забезпечує підвищену стабільність властивостей виробів з чавуну марки СЧ350.

Величини міцності  $\sigma_B$  (не менше) і твердості  $HB$  (не більше) виливків із сірих чавунів з пластинчастим графітом сильно корельовані з показниками їх хімічного складу, зокрема з вуглецевим еквівалентом, ступенем евтектичності, відношенням відсоткового вмісту вуглецю до вмісту кремнію. Міцність і твердість чавуну з пластинчастим графітом знаходяться у зворотній залежності від вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності хімічного складу чавуну. Коефіцієнти кореляції  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$  з відношенням  $C/Si$  також мають знак «мінус». Зазначене відповідає уявленню щодо механізму формування властивостей доевтектичних чавунів. Відмічені залежності чітко проявляються при зміні величин  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$  у достатньо

широких інтервалах, коли дисперсії коливань  $\sigma_B$  і  $HB$  суттєво менші, ніж діапазони зміни  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$ . Розроблено формули (регресійні рівняння) для прогнозування залежності механічних властивостей чавунів з пластинчастим графітом від показників їх хімічного складу. Запропоновані формули уточнюють аналогічні рішення (формули), що наведені у літературних джерелах, завдяки визначенню показників хімічного складу чавуну на основі ймовірнісного підходу із застосуванням методу Монте-Карло. Рекомендовано використовувати такий підхід у практиці ливарних підприємств при вирішенні задачі прогнозування якості литва не тільки з чавуну, а й зі сталі та більш складних за хімічним складом сплавів.

### **РОЗДІЛ 3**

## **ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ МЕТОДОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ І КОРИГУВАННЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЛИВАРНОГО ЧАВУНУ ПРИ ВИПЛАВЛЕНІ ЙОГО В ІНДУКЦІЙНИХ ТИГЕЛЬНИХ ПЕЧАХ**

### **3.1. Дослідження стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових виробів із синтетичного ливарного чавуну.**

Незважаючи на велику кількість публікацій, присвячених синтетичним чавунам і ливарним виробам з них, недостатньо дослідженою залишається тема стабільності їх хімічного складу і механічних властивостей у різних партіях, плавках. Безумовно, що певною мірою стабільність хімічного складу і механічні властивості ливарного чавуну, який виплавляють в індукційних тигельних печах, вже розглянуто. Але ця тема настільки велика, що потребує подальшого всебічного вивчення. Особливо в напрямі розроблення методології контролю, управління та удосконалення ливарних технологій.

Сучасна технологія виплавлення в індукційних тигельних печах чавуну, призначеного для виготовлення гальмівних колодок і фрикційного «клину Ханіна» рухомого складу залізниці, в цілому забезпечує необхідний вміст хімічних елементів і механічних властивостей ливарних виробів. Водночас поглиблене дослідження стабільності якості литва потрібно для формування науково-технологічної бази та подальшого розвитку методології контролю і регулювання хімічного складу синтетичного чавуну в процесах виплавлення, кристалізації й виготовлення з нього ливарної продукції.

У даній дисертаційній роботі термін «стабільність» стосовно технології ливарного виробництва і якості литва із чавуну використовується в науковому аспекті з позицій енциклопедичного трактування цього поняття. У нашому дослідженні, результати якого розглянуто нижче, поняття «стабільність» використано для характеристики здатності технології виплавлення синтетичного чавуну і виробництва з нього литва різного призначення функціонувати, не змінюючи свій стан, зберігати і проявляти

свої властивості, перебувати у рівновазі, витримуючи вплив зовнішніх факторів, підтримуючи сталість у часі. При цьому поняття «стабільність» розглядається в прив'язці до суті питань у контексті дослідження ефективності технології виплавлення синтетичного чавуну і якості ливарної продукції, виготовленої з нього.

Зазначимо, поняття «стабільність» використовується у промисловості найчастіше по відношенню до стабільності механічних систем. Але нерідко це поняття застосовують й в інших, окрім техніки, наукових сферах, навіть в теорії державного управління, в економіці, при розгляді розвитку фінансових ринків тощо [91]. В даній дисертаційній роботі при аналізі виробництва ливарної продукції з чавуну першочергове завдання полягало у виявленні показників (параметрів) цього процесу, які об'єктивно відображають його стабільність та/або характеризують якість виготовленого литва, а також змінні величини та фактори, від яких стабільність залежить. Результатами дослідження необхідно було визначити основні зовнішні фактори, які найбільше дестабілізують хімічний склад чавуну і механічні властивості виготовленої з нього продукції. До того ж предметом дослідження були не тільки питання, які стосуються технології виплавки синтетичного чавуну, а й увесь цикл виробництва ливарної продукції відповідного призначення, включаючи наукові й технологічні основи методології контролю і регулювання хімічного складу синтетичного чавуну в процесі його плавки та виготовлення ливарних виробів.

Перелік названих питань є по суті програмою максимум в темі, що розглядається. При виконанні даної дисертації проаналізовано результати дослідження хімічного складу і властивостей синтетичного чавуну, виплавленого на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ», з якого було виготовлено промислові партії гальмівних колодок і фрикційного «клину Ханіна» для залізниці [4, 6–7, 41]. Особливість даної роботи полягає, окрім встановлення ступеню стабільності хімічного складу і механічних властивостей ливарних виробів, в намаганні оцінити вплив випадкових похибок фіксації, контролю в

промислових умовах зазначених показників на загальні висновки щодо поставлених питань.

Нижче наведено результати статистичної обробки масивів інформації та її аналізу щодо хімічного складу і механічних властивостей більш ніж 200 партій (плавов) гальмівних колодок типу «М» і «клину Ханіна», які отримані безпосередньо в промислових умовах заводу ТОВ «М-ЛИТ» (див. додаток Б і додаток В даної дисертаційної роботи). Під час статистичної обробки первинної інформації щодо вмісту хімічних елементів у чавуні та механічних властивостей виробів з нього на першому етапі не здійснювали будь-яку корекцію масивів даних шляхом видалення сумнівних значень, аби не втратити відомості, важливі з наукової й практичної точок зору. Тобто не викреслювали з аналізу інформацію, яка має прихований характер. У зв'язку із зазначеним мета дослідження полягала у виявленні достовірності даних щодо вмісту хімічних елементів у складі синтетичного чавуну і його механічних властивостей, які отримані безпосередньо в умовах промислового виробництва. Також в оцінці впливу на достовірність даних відсіву грубих і випадкових помилок з використанням методів прикладної статистики. Ґрунтовні результати досліджень процесу доменної плавки чавуну, що виконані в Інституті чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України і представлені в монографії [92], засвідчили ефективність подібного наукового підходу.

При виконанні даного розділу дисертації дані стосовно хімічних елементів в чавуні та механічних властивостей гальмівних колодок типу «М» і «клину Ханіна» оцінювали за правилом «трьох сигм» для виключення з аналізу стабільності цих показників грубих помилок. Тобто з масивів даних були видалені точки, які виходили за межі трьох сигм, де  $\sigma$  (сигма) – середньоквадратичне відхилення змінної від її середнього значення. З масивів первинних даних були видалені очевидно помилкові значення також методом експертної оцінки. В програмному комплексі Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України передбачена процедура їх

виявлення і видалення [92, с. 80–82]. В роботі [53], наприклад, явні «викиди» видалялися з розподілів значень показників чавуну, який досліджували, на підставі досвіду експертів. Це загальноприйнятий підхід при виконанні подібних досліджень.

Підкреслимо, що вибір ливарного заводу ТОВ «М-ЛИТ» (м. Нікополь Дніпропетровської області), як майданчика для проведення досліджень в промислових умовах, було обґрунтовано, по-перше, сучасним рівнем обладнання на цьому підприємстві і, по-друге, тим, що на ньому виготовляється продукція відповідального призначення. Під час виконання досліджень, результати яких розглянуто нижче, було проведено аудит технології виробництва синтетичного чавуну і литва з нього. Мета технологічного аудиту полягала у встановленні фактичних розподілів значень вмісту вуглецю, кремнію, марганцю, фосфору, сірки у хімічному складі чавуну, а також величин твердості й міцності готових ливарних виробів. Під час аудиту була оцінена надійність і стабільність технології виробництва литва на цьому підприємстві. Про висновки аудиту певною мірою свідчать наступні результати досліджень, встановлені в процесі роботи над дисертацією.

Вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$  чавуну для гальмівних колодок, розрахований за формулами, наведеними у статтях [45, 46, 53], знаходився в діапазоні (3,13...3,64) % при вмісті вуглецю в діапазоні (2,76...3,04) %. В дослідженому чавуні СЧ350 діапазон  $C_{\text{екв}}$  дорівнював (2,93...3,53) %, діапазон вмісту  $C$  – (2,75...3,06) %. Відношення  $C/Si$ , вмісту вуглецю до вмісту кремнію, яке певною мірою відповідає за утворення відбілу в чавуні, знаходилося в діапазоні 2,33...2,80 при виготовленні гальмівних колодок і 1,88...2,54 при виготовленні «клину Ханіна». Ступінь евтектичності чавуну

$S_{\text{евт}}$  розраховували за формулою 
$$S_{\text{евт}} = \frac{\% C + 0,15 (\% Si) - 2,1}{2,2 - 0,15 (\% Si)} \quad [49]$$
 та

класичною формулою 
$$S_{\text{евт}} = C / [4,3 - 0,3 (Si + P)].$$
 Значення  $S_{\text{евт}}$ , розраховані за першою формулою, чавуну в гальмівних колодках

розташовувалися в діапазонах 0,41...0,55 при середньому значенні 0,48. В чавуні для «клина Ханіна» – в інтервалі 0,40...0,60 при середньому 0,52. Спільний вплив цих параметрів розплаву проявляється при формуванні мікроструктури і механічних властивостей чавуну, на чому акцентував увагу автор статті [53].

В доповнення до викладеного вище аналізу результатів відомих досліджень та публікацій додамо наступне.

Тематиці наукових досліджень у сфері теорії й технології виробництва литва з сірого синтетичного чавуну присвячено сотні опублікованих робіт – монографій, статей, доповідей. Зробити посилання на всі відомі літературні джерела немає можливості при всій повазі до їх авторів. Тому в наших статтях [1, 9 41, 47, 93 та ін.] визначені досягнення в сфері предмета дослідження, що розглядається в даному розділі дисертації, та виявлені неоднозначні, іноді суперечливі висновки та рекомендації. Особливу увагу зосередимо на дискусійних питаннях у цій темі.

При виконанні досліджень технології виплавлення і показників якості синтетичного чавуну різного хімічного складу, результати яких склали основу даної дисертації, за основу було взято висновки, представлених у фундаментальній монографії [2]. Відносно вимог до мікроструктури, механічних властивостей й експлуатаційних характеристик гальмівних колодок, виготовлених із сірого чавуну, то найбільш системно і глибоко це питання досліджено авторами монографії [5]. В цій роботі з високою достовірністю прямими експериментами показана ефективність використання чавуну для виготовлення гальмівних колодок, в першу чергу – локомотивних. Саме тому ці вироби були використані при дослідженні стабільності хімічного складу синтетичного чавуну, його контролю і системи регулювання в процесі плавки. Результати, висновки та рекомендації, які представлені в монографії [5], були одним з орієнтирів в роботі над даною дисертацією.



Ступінь впливу вуглецевого еквівалента на структуру та міцність виливків з чавуну різного хімічного складу висвітлено в статтях [45, 46, 53], підготовлених на базі результатів експериментальних і теоретичних досліджень. Наведений комплексний аналіз має безперечну наукову цінність. Але дієздатність висновків щодо зазначеного питання, схоже, обмежена діапазонами вуглецевого еквівалента досліджених чавунів і ливарних виробів.

Значна кількість ґрунтовних наукових публікацій присвячена особливостям механізму реформування структури графіту в чавунах, у тому числі в синтетичному чавуні. Прикладами робіт цього напрямку є статті [45, 46]. Перевага цих робіт полягає не тільки в представленні авторами результатів власних досліджень, а й в аналізі великого обсягу наукових джерел. Матеріали зазначених та інших подібних робіт опосередковано стосуються й теми регулювання хімічного складу синтетичного чавуну в процесі плавки – щодо можливого впливу такого регулювання на структуру і механічні властивості виливків. В цілому, незважаючи на велику кількість публікацій теоретичних і прикладних робіт, питання, присвячені результатам оцінювання стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну різного призначення, глибоко не досліджені й в технічній літературі всебічно не представлені. Тому при виконанні досліджень було проаналізовано поряд з літературними джерелами й відповідний матеріал із технологічних інструкцій та інформаційних баз ливарних заводів.

Хімічний склад і вуглецевий еквівалент синтетичного чавуну промислових партій, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М» згідно з вимогами ГОСТ 30249-97, а також їх твердість і міцність на злам представлені в таблиці 1.1. Аналогічні показники промислових партій «клину Ханіна», виготовлених з чавуну СЧ35 (СЧ350) відповідно до вимог ГОСТ 1412-85, ДСТУ 8833:2019, наведені в таблиці 3.2.

Згідно з ГОСТ 30249-97 хімічний склад чавуну гальмівних колодок типу «М» повинен знаходитися в межах, мас., %:  $C = 2,7...3,4$ ;  $Si = 0,7...1,0$ ;  $Mn = 0,4...0,9$ ;  $P = 0,4...0,9$ ;  $S$  – не більше 0,20;  $Ba = 0,05...0,2$ ;  $Ca = 0,05...0,15$ . Наявність  $Ba$  або  $Ca$  у чавуні забезпечується модифікаторами. Контроль їх вмісту в чавуні не є обов'язковим. Твердість HB має бути в межах 229...302. Руйнівна сила (міцність) на злам – не менше 127,5 кН (13тс).

Статистичні характеристики масивів показників вмісту елементів у хімічному складі чавуну, величин твердості HB, міцності, вуглецевого еквівалента  $C_{екв}$ , ступеню евтектичності  $S_{евт}$ , у виливках гальмівних колодок (вибірка 1, табл. 3.1) і «клину Ханіна» (вибірка 2, табл. 3.2) наведено у таблиці 3.3. Гістограми розподілу цих показників представлені на рис. 3.1–3.3. Зазначені гістограми не повною мірою відповідають нормальному закону розподілу Гаусса. Але їх цінність полягає в тому, що вони відображають без будь-якої корекції величини досліджуваних показників, які зафіксовані безпосередньо на промисловому об'єкті. В роботі [53], наприклад, в подібних випадках на підставі експертних оцінок рядки у вибірках, які ймовірно негативно впливали на достовірність визначення закону розподілу досліджуваних показників, були видалені із розрахунків.

На цьому етапі роботи фільтрація даних не проводилась для збереження документальності інформації щодо ситуацій, які мають місце в промисловій практиці при виробництві литва.

Перевірка за t-критерієм Стюдента першої й другої вибірок (табл. 3.1–3.3) на належність цих розподілів до однієї генеральної сукупності не підтвердила справедливості такого припущення. До однієї генеральної сукупності належать лише розподіли вмісту сірки в чавуні різного сортаменту, що підкреслює спроможність технології виробництва синтетичного чавуну різного призначення гарантовано забезпечувати низький вміст цього елемента (не більше 0,05 %) в металі.

Таблиця 3.1

Хімічний склад чавуну, твердість HB і міцність на злам  
гальмівних колодок «М»

Номер партії	Вміст елементів у хімічному складі чавуну, % (за масою)					Твердість HB	Руйнівна сила на злам, тс
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>		
1.	2,89	1,20	0,76	0,74	0,035	235/235	21,0
2.	2,99	1,12	0,72	0,67	0,032	241/241	19,8
3.	2,93	1,17	0,76	0,68	0,032	255/285	19,18
4.	2,88	1,08	0,70	0,67	0,034	302/302	13,6
5.	2,93	1,15	0,68	0,63	0,033	235/241	21,0
.							
104.	2,81	1,18	0,87	0,82	0,033	262/277	17,3
105.	2,76	1,18	0,87	0,74	0,038	269/285	19,2

**Примітка.** Значення твердості вказані за результатами замірів у двох точках виробу. Повний обсяг таблиці 3.1 наведено у додатку Б даної дисертації.

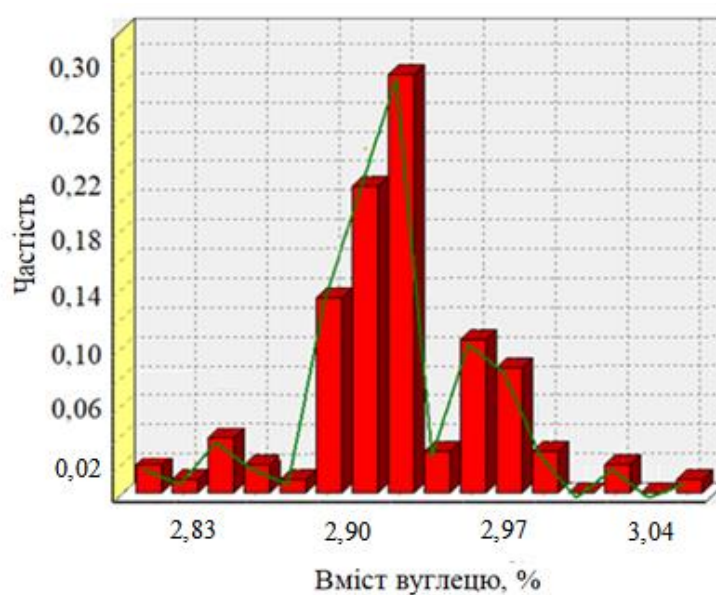
Таблиця 3.2

Хімічний склад, вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$ , % ступінь евтектичності  $S_{\text{евт}}$   
і твердість HB чавуну СЧ350 (СЧ35) промислових партій  
«клину Ханіна»

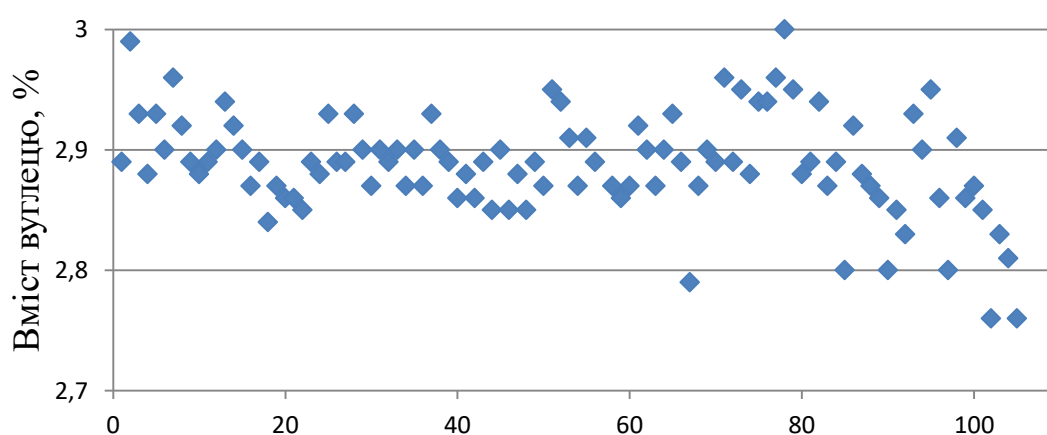
Номер партії	Вміст елементів у хімічному складі чавуну, % (за масою)					Твердість HB	$C_{\text{екв}}$ , %	$S_{\text{евт}}$
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>			
1.	3	1,26	0,89	0,041	0,034	255/248	3,38	3,38
2.	2,99	1,21	0,84	0,044	0,033	255/255	3,36	0,53
3.	3	1,43	0,9	0,033	0,027	248/248	3,42	0,56
4.	2,91	1,43	0,81	0,039	0,03	248/255	3,40	0,52
5.	2,87	1,24	0,78	0,035	0,033	248/248	3,24	0,47
...								
106.	2,92	1,33	0,79	0,036	0,034	255/255	3,32	0,51
107.	2,92	1,27	0,75	0,035	0,028	248/255	3,30	0,50

**Примітка.** Вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$  чавуну розраховано по формулі  $C_{\text{екв}} = C + 0,3 Si + 0,33 P + 0,40 S - 0,03 Mn$ . Відповідно до ДСТУ 8833:2019 хімічний склад чавуну має бути, %:  $C = 2,9...3,0$ ;  $Si = 1,2...1,5$ ;  $Mn = 0,7...1,1$ ;  $P$  – не більше 0,2;  $S$  – не більше 0,12. Твердість – не більше 270. Повний обсяг таблиці 3.2 наведено у додатку В даної дисертації.

Окремого пояснення потребують дані стосовно вмісту кремнію, наведені на рис. 3.2. Гістограма на рис. 3.2 суттєво зміщена у бік максимально допустимих величин вмісту  $Si$ . У випадках, коли вміст кремнію в чавуні перевищував граничне значення (1,0 %), але не виходив за межі допуску ( $\pm 0,02$  %), регламентованого ГОСТ 30249-97, вірогідно в журнал даних хімічного складу чавуну були занесені граничні величини вмісту кремнію. Це не порушує достовірність інформації про відповідність вмісту кремнію в чавуні вимогам стандарту.



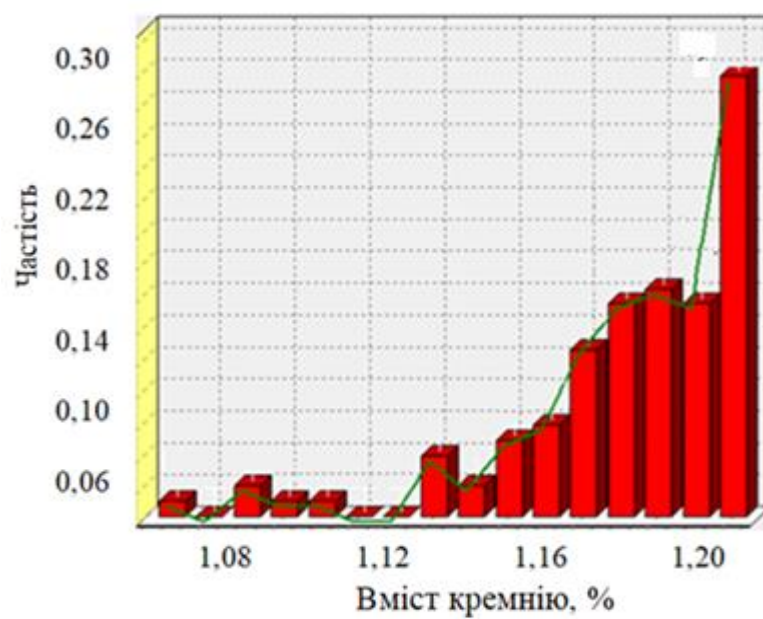
а



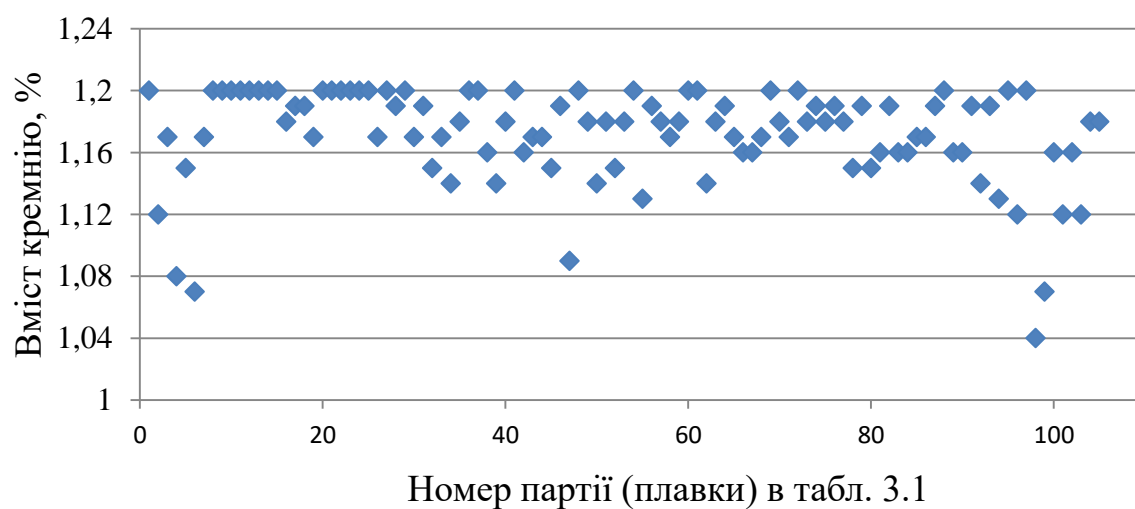
Номер партії (плавки) в табл. 3.1

б

Рис. 3.1. Гістограма (а) розрахунку вмісту вуглецю і його величини (б) в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М».



а



а

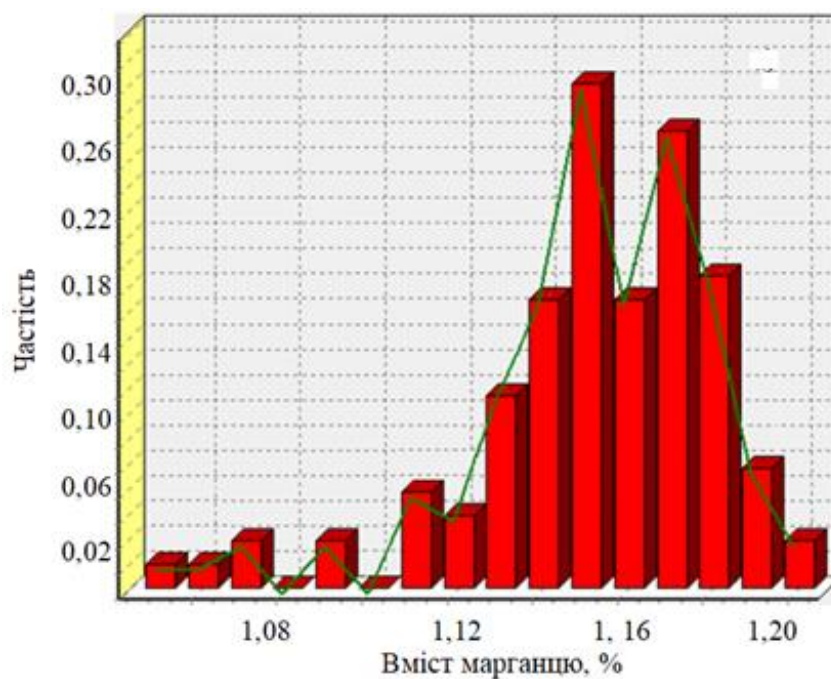
Рис. 3.2. Гістограма (а) розрахунку вмісту кремнію і його величини (б) в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М».

Таблиця 3.3

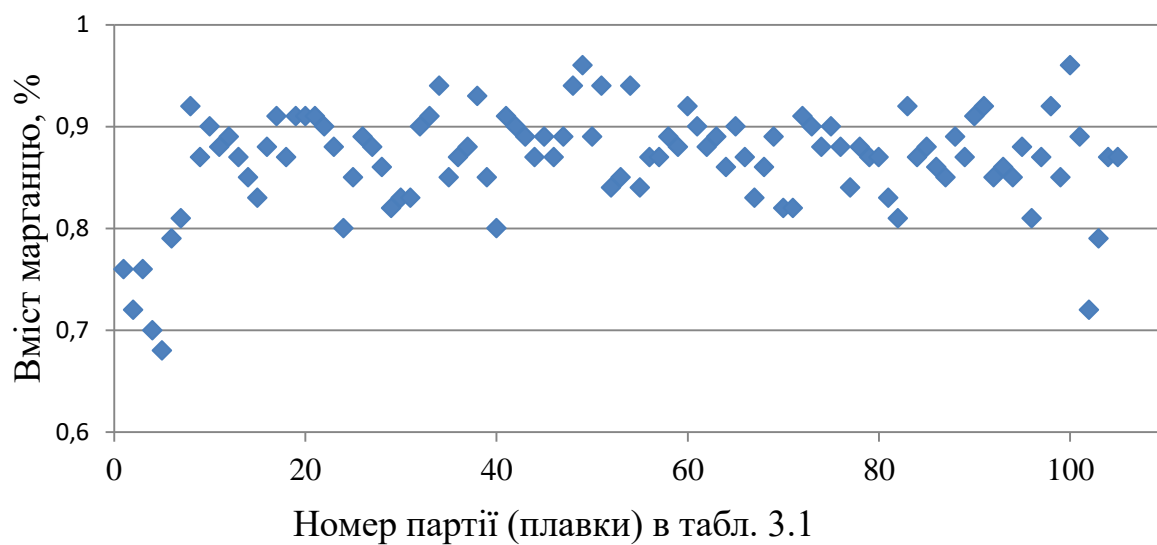
Статистичні характеристики масивів першої (табл. 3.1) вибірки ( $N = 105$ , гальмівні колодки) і другої (табл. 3.2) вибірки ( $N = 107$ , «клин Ханіна»)

№ п/п	Елементи	Перша вибірка гальмівні колодки	Друга вибірка «клин Ханіна»
1.	$C$	$\frac{2,76...3,04}{2,889}$	$\frac{2,75...3,06}{2,948}$
2.	$Si$	$\frac{1,04...1,2}{1,17}$	$\frac{1,08...1,55}{1,329}$
3.	$Mn$	$\frac{0,68...0,96}{0,867}$	$\frac{0,69...1,01}{0,844}$
4.	$P$	$\frac{0,61...0,83}{0,699}$	$\frac{0,019...0,059}{0,034}$
5.	$S$	$\frac{0,02...0,044}{0,031}$	$\frac{0,018...0,041}{0,030}$
6.	HB1	$\frac{229...302}{251}$	$\frac{235...262}{248}$
7.	HB2	$\frac{229...302}{261}$	$\frac{235...255}{246}$
8.	$C/Si$	$\frac{2,33...2,798}{2,469}$	$\frac{1,88...2,548}{2,227}$
9.	$C_{\text{екв}}$	$\frac{3,322...3,632}{3,458}$	$\frac{3,08...3,51}{3,34}$
10.	$S_{\text{евт}}$	$\frac{0,412...0,552}{0,477}$	$\frac{0,398...0,601}{0,524}$

**Примітка.** Вміст у хімічному складі чавуну елементів  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  і величина  $C_{\text{екв}}$  в таблиці 1.3 представлено у відсотках. У чисельнику – мін–макс, у знаменнику – середнє значення показника.  $N$  – кількість партій (плавов) чавуну у вибірках, які досліджено.

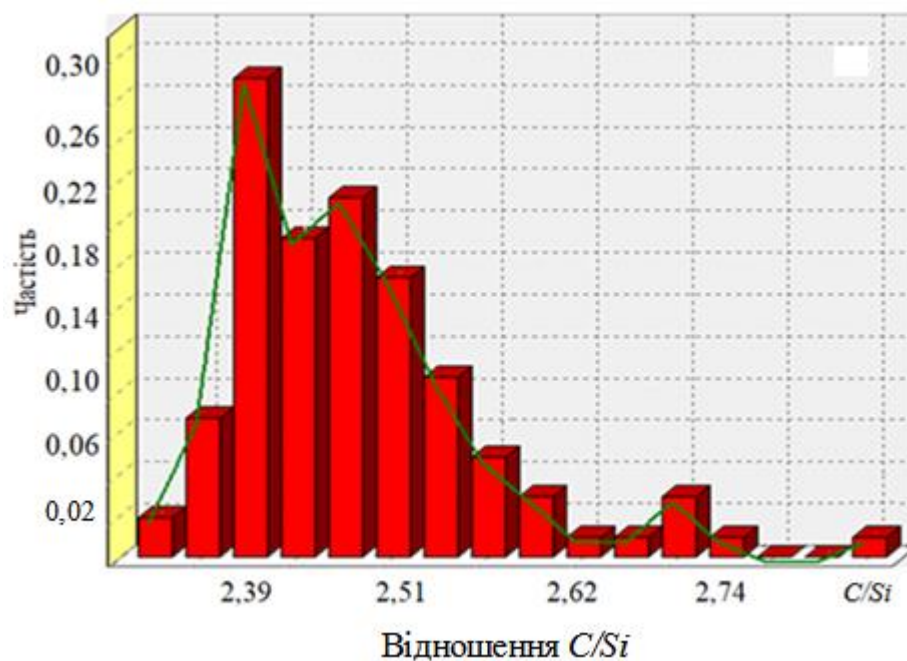


а

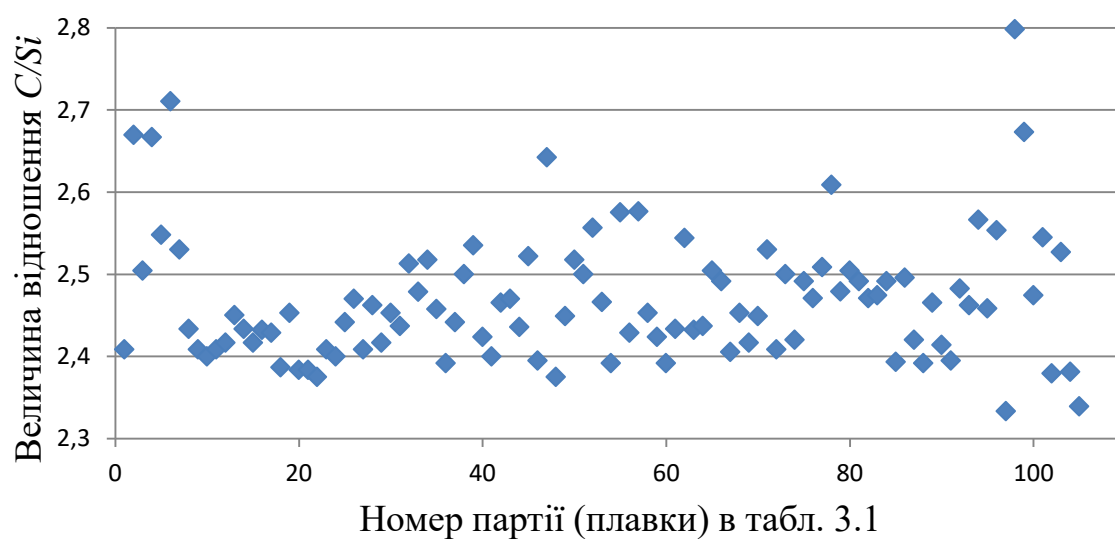


б

Рис. 3.3. Гістограма (а) розподілу вмісту марганцю і його величини (б) в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М».



а



б

Рис. 3.4. Гістограма (а) розподілу відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію та величини цього відношення (б) в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М».



Діапазон (2,76...3,04) % при середньому значенні 2,89 % масової долі вуглецю в партіях чавуну на практиці суттєво менший, ніж (2,7...3,4) %, що передбачено в ГОСТ 30249-97. Діапазони розкиду вмісту *Mn*, *Si*, *P* також помітно вужчі, ніж вказані у цьому стандарті. Позитивної оцінки заслуговує низький рівень вмісту сірки (0,020...0,044) % в чавуні (табл. 3.3) порівняно зі стандартом, який допускає значення 0,2 %. Низький вміст сірки має і чавун СЧ350, з якого виготовляли «клин Ханіна» (табл. 3.3).

В статтях [41, 47, 48 та ін.] проаналізовано реальний хімічний склад, властивості, вуглецевий еквівалент та інші узагальнені показники сірого синтетичного чавуну, виплавленого в індукційній тигельній печі сучасного ливарного підприємства, на прикладі дослідження промислових партій чавунних гальмівних колодок типу «М» та фрикційного «клин Ханіна» для залізниці.

Підкреслимо особливо важливе. При статистичному аналізі показників вмісту хімічних елементів, твердості, вуглецевого еквівалента, ступеню евтектичності чавуну промислових партій було встановлено і показано вище, що очищення заводських масивів даних від грубих помилкових значень практично не впливало на загальні характеристики. Наприклад, після видалення випадкових похибок з масивів заводських даних щодо показників чавуну фрикційного «клин Ханіна» середня величина вмісту вуглецю змінилася (мас.,%) з 2,948 до 2,955. Тобто з точністю до третього знака після коми залишилася однаковою. Такий самий результат отримали і відносно вмісту інших хімічних елементів та показників якості чавуну. Це дозволяє зробити висновок про достовірність заводських даних щодо контролю в промислових умовах якості чавуну.

Викладені у даній дисертації результати досліджень хімічного складу, вуглецевого еквівалента, твердості, міцності, ступеня евтектичності чавуну, який виплавляють на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» для виготовлення литвом фрикційного «клин Ханіна», засвідчили, що його вуглецевий

еквівалент  $C_{\text{екв}}$  залежить головним чином від вмісту вуглецю (коефіцієнт кореляції 0,887), у меншій мірі – від вмісту кремнію (коефіцієнт кореляції  $\sim 0,6$ ). Підкреслимо, що кореляції між  $C_{\text{екв}}$  і вмістом кремнію у чавуні гальмівних колодок не виявлено. Марганець на  $C_{\text{екв}}$  майже не впливав (коефіцієнт кореляції менше 0,4). В першому розділі дисертації показано, що величини вмісту хімічних елементів у складі дослідженого чавуну СЧ350 не корелювали ні між собою, ні з вуглецевим еквівалентом. Аналогічні результати були отримані при дослідженнях чавуну, призначеного для виготовлення гальмівних колодок [41]. Ця особливість позитивно характеризує технологію виплавлення чавуну на заводі ТОВ «М-ЛИТ» з точки зору можливості без зайвих складнощів коригувати хімічний склад рідкого металу безпосередньо у процесі плавки. Оскільки кореляції між величинами вмісту хімічних елементів у чавуні розглянутих партій ливарних виробів не виявлено, то ці величини слід вважати випадковими в межах діапазонів їх розкиду, полів розподілу. Відповідно до такого підходу побудовано методологію коригування хімічного складу рідкого чавуну в процесі плавки, представлену у даній дисертації.

Стосовно властивостей фрикційного «клину Ханіна» ще раз відмітимо, що твердість чавуну не залежала від  $C_{\text{екв}}$  у відносно вузькому діапазоні його розподілу. Сильна кореляція проглядається між вмістом вуглецю у хімічному складі дослідженого чавуну і вуглецевим еквівалентом (коефіцієнт кореляції 0,887) та зі ступенем евтектичності  $S_{\text{евт}}$ . Коефіцієнт кореляції між  $C$  і  $S_{\text{евт}}$  дорівнював 0,929. Але між відношенням  $C/Si$  й вмістом  $C$  у чавуні «клину Ханіна» кореляція зовсім не відмічена, в той час як коефіцієнт кореляції між  $C$  і  $C/Si$  у чавуні гальмівних колодок складав 0,448. Між  $C/Si$  і вмістом кремнію у чавуні гальмівних колодок коефіцієнт кореляції дорівнював мінус 0,871 [41]. В чавуні «клину Ханіна» коефіцієнт кореляції між  $C/Si$  і вмістом кремнію був ще більший – мінус 0,974. Необхідно також звернути увагу на те, що коефіцієнт кореляції між величинами твердості, виміряною у двох точках HB1 і HB2 гальмівних колодок, дорівнював 0,894. У виробах «клин

Ханіна» коефіцієнт кореляції був меншим, а саме 0,664. Це зумовлено різними розташуваннями точок заміру твердості в цих виробках.

Більш детально питання щодо показників ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , яке може суттєво впливати на властивості чавуну [49], проаналізуємо далі. Відносно експлуатаційних характеристик ливарних виробів, зокрема коефіцієнта тертя гальмівних колодок, то зазначимо, що залежність цього коефіцієнта від вуглецевого еквівалента в діапазоні величин, розглянутому в нашій роботі [48], чітко не проявлялося. Про це свідчать дані, наведені у таблиці 3.4, а гістограми на рис. 3.5 і 3.6.

Для наочності подальшого аналізу скористаємося результатами статистичної оцінки<sup>2</sup> розподілів вмісту хімічних елементів, вуглецевого еквіваленту  $C_{\text{екв}}$ , ступеню евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , відношення  $C/Si$  у промислових партіях синтетичного сірого чавуну (таблиця 3.1), який виплавляють на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» для виготовлення гальмівних колодок типу «М» і клину фрикційного («клину Ханіна»).

В таблиці 3.4 наведені дані, які надають можливість оцінити наскільки у промисловій практиці заводу ТОВ «М-ЛИТ» при виробництві зазначеної продукції використовуються діапазони розкиду вмісту хімічних елементів у складі чавуну порівняно з їх діапазонами, регламентованими стандартами.

В роботах [41, 47 та ін.] і розділі 3.1 дисертації показано, що діапазони варіювання хімічних елементів у складі чавуну гальмівних колодок значно менші, ніж аналогічні діапазони, регламентовані у відповідному стандарті. При подальшому зіставленні діапазонів вуглецевого еквівалента чавуну, призначеного для виготовлення «клину Ханіна», розрахунки  $C_{\text{екв}}$  виконано за формулою (1.3). При цьому в розрахунках максимально можливих значень  $C_{\text{еквmax}}$  вміст  $Mn$  прийнято мінімальним, оскільки згідно з формулою (1.3) його вплив на  $C_{\text{екв}}$  негативний, а вміст сірки у чавуні гальмівних колодок

<sup>2</sup> Авторка висловлює вдячність доктору технічних наук, професору Д.М. Тогобіцькій за допомогу в проведенні статистичної обробки масивів експериментальних даних.

прийнято  $S=0,20$  мас.%, В розрахунках  $C_{\text{екв}_{\min}}$  вміст  $S=0,05$  мас.%, В розрахунках  $C_{\text{екв}}$  «клину Ханіна» вважали, що  $P = 0,2 \%$ ,  $S = 0,12 \%$ .

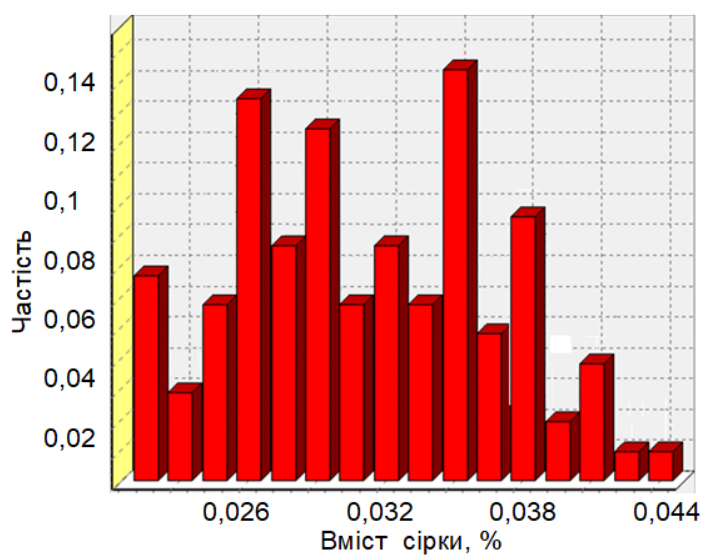
Таблиця 3.4

Статистичні параметри розподілів вмісту (мас.%,) хімічних елементів, вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , %, ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , відношення  $C/Si$  у чавунах промислових партій, що виплавляють на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» для виробництва гальмівних колодок типу «М» і фрикційного «клину Ханіна» [41, 47]

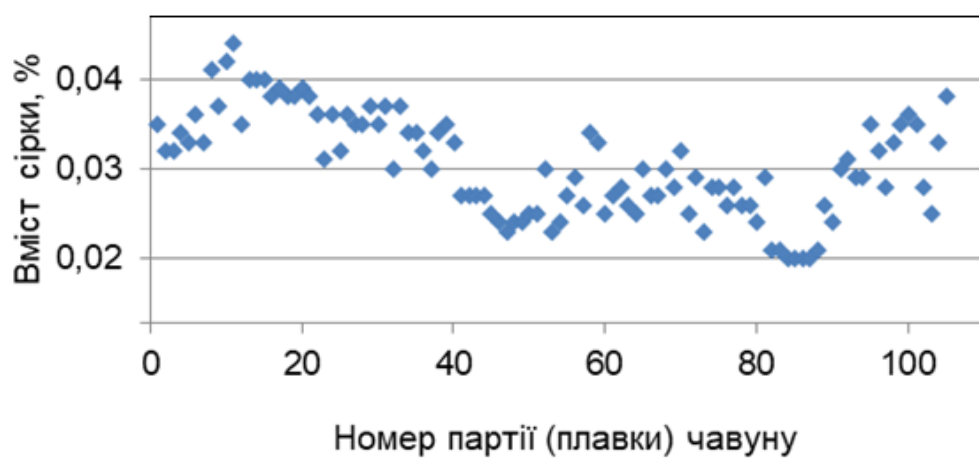
Параметри розподілу	$C$	$Si$	$Mn$	$P$	$S$	$C_{\text{екв}}$	$S_{\text{евт}}$	$C/Si$
Середні значення	$\frac{2,89}{2,95}$	$\frac{1,17}{1,33}$	$\frac{0,87}{0,84}$	$\frac{0,7}{0,03}$	$\frac{0,03}{0,03}$	$\frac{3,47}{3,35}$	$\frac{0,48}{0,52}$	$\frac{2,47}{2,22}$
Мінімальні	$\frac{2,76}{2,75}$	$\frac{1,04}{1,08}$	$\frac{0,68}{0,69}$	$\frac{0,61}{0,02}$	$\frac{0,02}{0,02}$	$\frac{3,33}{3,08}$	$\frac{0,41}{0,40}$	$\frac{2,33}{1,88}$
Максимальні	$\frac{3,04}{3,06}$	$\frac{1,20}{1,55}$	$\frac{0,96}{1,01}$	$\frac{0,83}{0,06}$	$\frac{0,04}{0,04}$	$\frac{3,64}{3,52}$	$\frac{0,55}{0,60}$	$\frac{2,80}{2,54}$

**Примітки:** 1. В чисельнику наведені дані щодо гальмівних колодок типу «М» для рухомого складу залізниці; в знаменнику – «клину Ханіна».

2. Значення  $C_{\text{екв}}$  розраховані за формулою (1.3). 3. Ступінь евтектичності чавуну розраховували за формулою  $S_{\text{евт}} = \frac{C+0,15Si-2,1}{2,2-0,15Si}$  [49]. Вміст  $C$  та  $Si$  представлено у відсотках. 4. Величини вмісту  $Si$  відповідають вимогам стандарту, оскільки допуск на вміст сірки складає  $\pm 0,2 \%$ . 5. Обсяг вибірки плавок чавуну для гальмівних колодок 105, «клину Ханіна» 107.



а)



б)

Рис. 3.5. Гістограма (а) розподілу вмісту сірки та її величини (б) в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М».

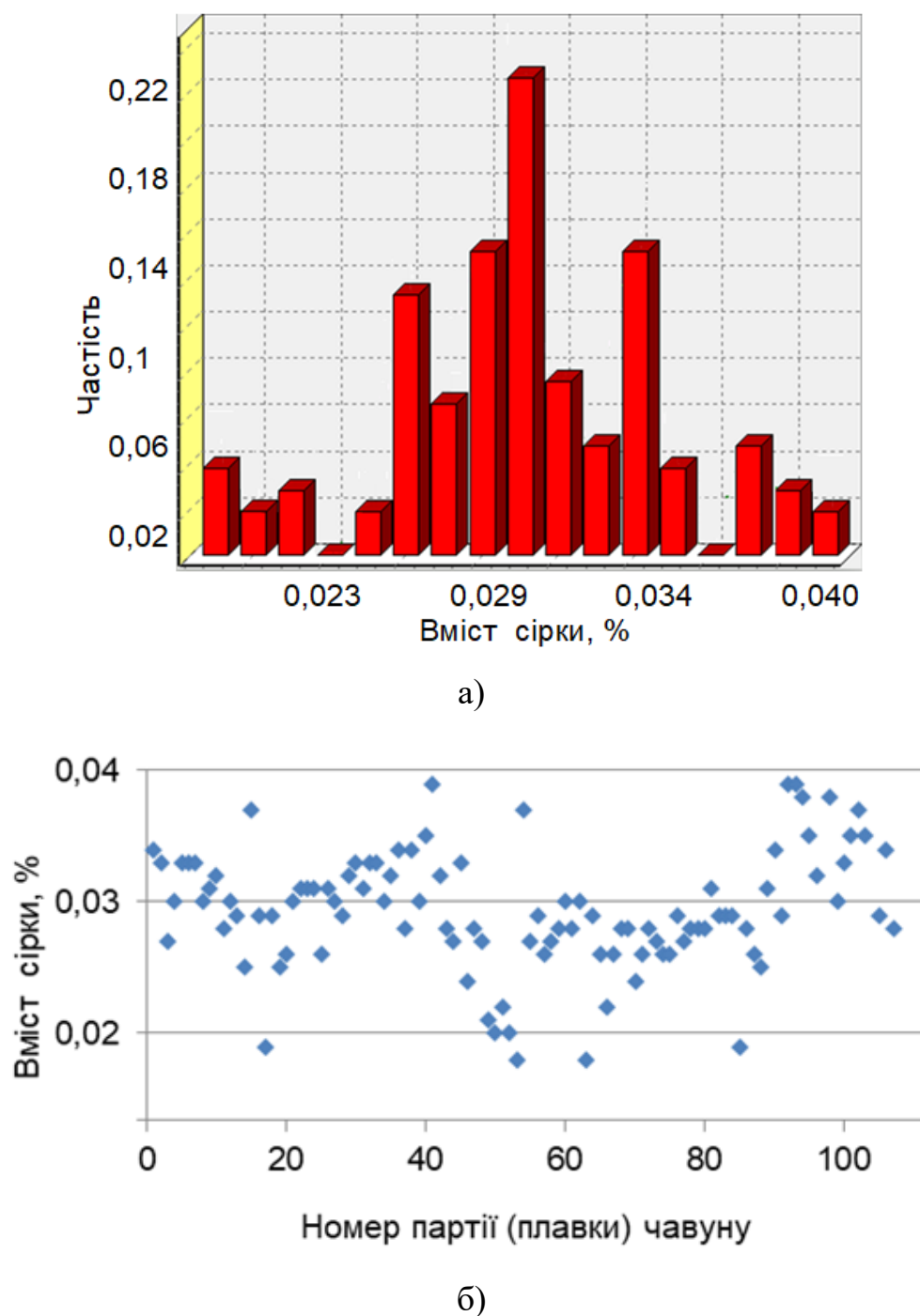


Рис. 3.6. Гістограма (а) розподілу вмісту сірки та її величини (б) в партіях чавуну, з якого виготовлені деталі «клин Ханіна».

Розрахунки за формулою (1.3) мінімальних і максимальних величин вуглецевого еквівалента чавуну гальмівних колодок типу «М» призвели до наступних результатів. При використанні даних щодо вмісту хімічних елементів у складі чавуну отримали, %:  $C_{\text{екв}_{\min}} = 3,27$  і  $C_{\text{екв}_{\max}} = 3,67$ . Ці

величини майже співпадають із значеннями в таблиці 1.1:  $C_{\text{екв}_{\min}} = 3,33$  і  $C_{\text{екв}_{\max}} = 3,64$ . В разі використання в розрахунках за формулою (1.3) величини вмісту хімічних елементів, регламентованих у ГОСТ 30249-97, отримали,  $\%:C_{\text{екв}_{\min}} = 3,04$  і  $C_{\text{екв}_{\max}} = 4,04$ . Таким чином підтверджено висновок, висловлений у статтях [50, 51 та ін.], що діапазони розкиду величин вмісту хімічних елементів і вуглецевого еквівалента чавуну, з якого виготовляють гальмівних колодки залізничного транспорту на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» [4, 6–7], значно вужчі, ніж діапазони вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$ , регламентовані названим стандартом. Підкреслимо, що зазначене свідчить про стабільність технології виплавлення чавуну вказаного сортаменту в 3-хтонній тигельній індукційній печі цього заводу [4].

Особливо відзначимо, що в умовах промислового виробництва стабільність технології виготовлення і властивостей ливарних виробів характеризують не тільки і не стільки середні величини вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну, ступеня його евтектичності, відношення  $C/Si$ , а й більшою мірою дисперсії, коефіцієнти варіації, діапазони розкиду цих величин (таблицях 3.2-3.4). Підкреслюємо, що термін «стабільність» стосовно технології виробництва і якості синтетичного чавуну використовується в даній дисертаційній роботі та нашій статті [41] з позицій енциклопедичного трактування цього поняття. А саме, як здатність технології виплавлення чавуну і виготовлення з нього литва функціонувати, не змінюючи свій стан, зберігати і проявляти свої властивості, перебувати у рівновазі, підтримуючи сталість у часі.

Діапазони коливань вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  синтетичного сірого чавуну, виплавленого на заводі ТОВ «М-ЛИТ» для виготовлення литвом гальмівних колодок і фрикційного «клин» Ханіна», показано в таблиці 3.4. Наведені дані проілюстровано гістограмами на рис. 3.5; 3.6; 3.7 і 3.8, які побудовані на базі первинного масиву даних. Згідно з розрахунками за формулою (1.3) при використанні величин вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  у чавуні,

наведених у цій таблиці, отримали:  $C_{\text{екв}_{\min}} = 3,07$  і  $C_{\text{екв}_{\max}} = 3,54$ . Значення співпадають з тими, що в таблиці 3.4. При розрахунках зі застосуванням вмісту хімічних елементів у складі чавуну відповідно до рекомендованого в ДСТУ 8833:2019 (таблиця 2.3) маємо,  $\%C_{\text{екв}_{\min}} = 3,34$  і  $C_{\text{екв}_{\max}} = 3,54$ . Зіставлення цих величин з попередньо визначеними показує різницю між величинами  $C_{\text{екв}_{\min}}$ . Обумовлено таке тим, що в промислових партіях чавуну вміст вуглецю ( $C = 2,75\%$ ) менший, ніж рекомендований в ДСТУ 8833:2019. Схоже, що в промислових умовах ливарного заводу складно дотримуватися діапазону  $C = 2,9 \dots 3,0\%$ , який рекомендовано у цьому ДСТУ. Нагадаємо, що хімічний склад чавуну, регламентований цим стандартом, є рекомендованим.

Вплив кремнію і марганцю у складі сірого чавуну на властивості й службові характеристики чавунних виробів, зазначені у статті [52], засвідчують, що навіть в регламентованих межах стандарту вміст хімічних елементів не гарантує відповідності вимог до властивостей, через можливі різні їх співвідношення. До цієї тези доречно додати, що різні співвідношення вмісту основних хімічних елементів у складі чавуну можливі й при незмінному вуглецевому еквіваленті. Аналіз формули (1.3), наприклад, свідчить, що для підтримання на одному рівні величини  $C_{\text{екв}}$  простіше за все при зменшенні вмісту будь-якого елемента у складі чавуну, окрім марганцю, збільшувати вміст вуглецю.

Зокрема, збільшення вмісту  $Si$  від мінімального значення  $Si = 0,7\%$  до максимального  $Si = 1,0\%$ , тобто на  $0,3\%$ , змінює  $C_{\text{екв}}$  чавуну на  $0,09\%$ . Для збереження  $C_{\text{екв}}$  незмінним в цьому випадку треба вміст вуглецю у складі чавуну зменшити на ці  $0,09\%$ . Для регламентованого стандартом вмісту вуглецю це не критично. Але за такої корекції хімічного складу чавуну зміниться й дуже суттєво відношення  $C/Si$ , на що треба реагувати. Таким чином можна вважати, що саме з цієї причини відношення  $C/Si$  слід використовувати в практиці ливарного виробництва як додатковий до  $C_{\text{екв}}$  вельми чуттєвий індикатор характеру кристалізації чавуну і формування



структури та властивостей ливарних виробів. У публікації [53] зазначено, що оптимальне відношення  $C/Si$  знижує ймовірність виникнення відбілу у чавуні, стимулюючи його кристалізацію за стабільною схемою, а не метастабільною, при якій в структурі формується цементит.

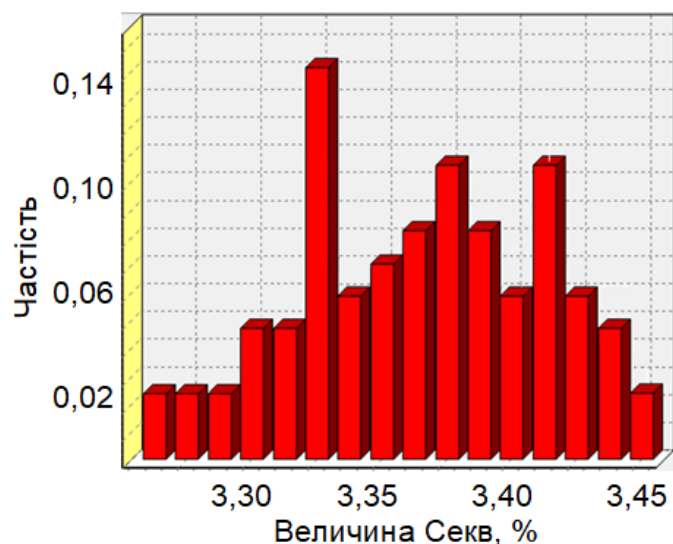


Рис.3.7. Гістограма розподілу величин вуглецевого еквівалента Секв, розрахованого за формулою (1.3), в партіях чавуну СЧ350, з якого виготовлені деталі «клин Ханіна».

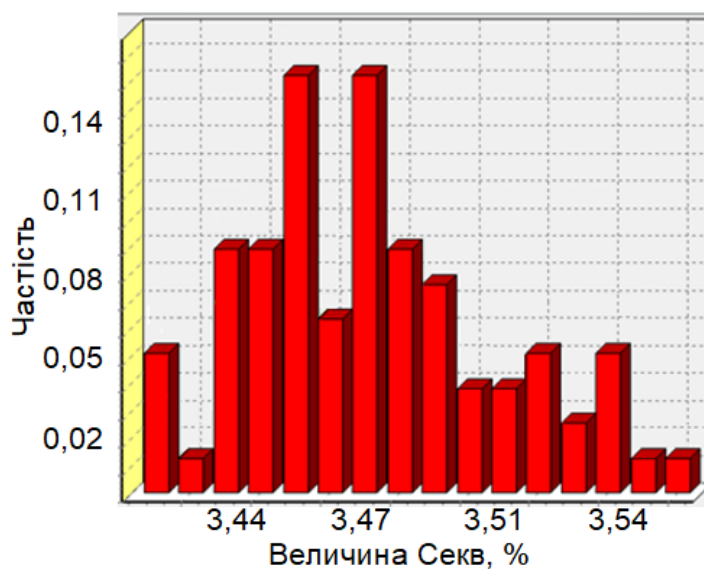


Рис. 3.8. Гістограма розподілу величин вуглецевого еквівалента, розрахованого за формулою  $C_{\text{екв}} = C + 0,3 (Si + P)$ , в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М».

Відносно низьке значення коефіцієнта  $G_c^{Mn} = 0,015$  і знак мінус перед  $Mn$  в рівнянні (1.3) свідчать, що з підвищенням вмісту марганцю вуглецевий еквівалент чавуну зменшується, але залежність ця слабка. В той же час відомо, що регулюванням відношення  $Mn/Si$  можна впливати на формування структури сірого чавуну і його властивості. В статті [52] показано, що «відношення  $Mn/Si$  в межах 0,75...1,0 забезпечує сприятливу структуру чавуну з пластинчастим графітом і підвищену стійкість під час експлуатації в умовах високих температур товстостінних ливарних виробів, зокрема слябінгових виливниць». При виробництві гальмівних колодок з чавуну, в якому вміст марганцю і вміст кремнію складають (мас.,%)  $Mn = 0,4...0,9$ , а кремній  $Si = 0,7...1,0$ , маємо відношення  $Mn_{min}/Si_{min} = 0,57$ ,  $Mn_{max}/Si_{max} = 0,9$ ;  $Mn_{min}/Si_{max} = 0,4$ ;  $Mn_{max}/Si_{min} = 1,29$ . Тобто можливий діапазон розкиду значень відношення  $Mn/Si$  значно ширший, ніж 0,75...1,0, який рекомендовано в роботі [52].

Зменшення вмісту сірки у чавуну, що, як відомо, позитивно впливає на якість ливарної продукції, зменшує  $C_{екв}$ . При зміні вмісту сірки у чавуні з 0,20 до 0,05 відсотків вуглецевий еквівалент при розрахунках його за формулою (1.3) зменшується на  $C_{екв} = 0,26 (0,20 - 0,05) \approx 0,039 \%$ .

В класичній літературі, а саме в довіднику [54] зазначено, що «вуглець і кремній є найважливішими елементами, які визначають структуру і властивості сірого чавуну». Гістограми розподілу вмісту кремнію і фосфору в промислових партіях чавуну, з якого на заводі ТОВ «М-ЛИТ» вироблено литвом «клин Ханіна» для рухомого складу залізниці, представлені на рис. 3.9 і 3.10 [41]. Співставленням гістограм показано, що видалення помилкових значень з масиву заводських даних розподілу щодо вмісту фосфору в промислових партіях чавуну суттєво наближає гістограму до класичного «нормального» розподілу Гаусса. Ці елементи визначають також положення вуглецевого еквівалента чавуну по відношенню до евтектики відповідно до інформації, представленої у класичному довіднику з чавунного лиття Н.Г. Гіршовича [54]. Фосфор впливає на  $C_{екв}$  аналогічно кремнію. Такі

твердження відображено у формулах для розрахунку вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  і ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , %:

$$C_{\text{екв}} = C + 0,3(Si + P); \quad (3.1)$$

$$S_{\text{евт}} = C/[4,26 - 0,3(Si + P)]. \quad (3.2)$$

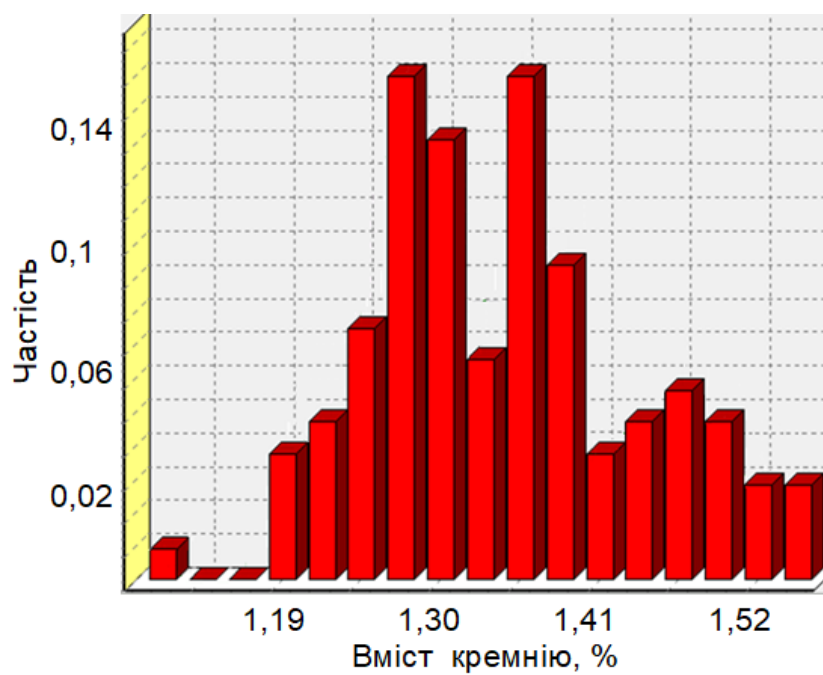
Вочевидь, що формула (3.1) являє собою спрощений варіант формули (1.3), а широко відома формула (3.2) зовнішньо і по суті відрізняється від формули (1.3), наведеної в книзі [15]:

$$S_{\text{евт}} = \frac{C+0,15Si-2,1}{2,2-0,15Si} \quad . \quad (3.3)$$

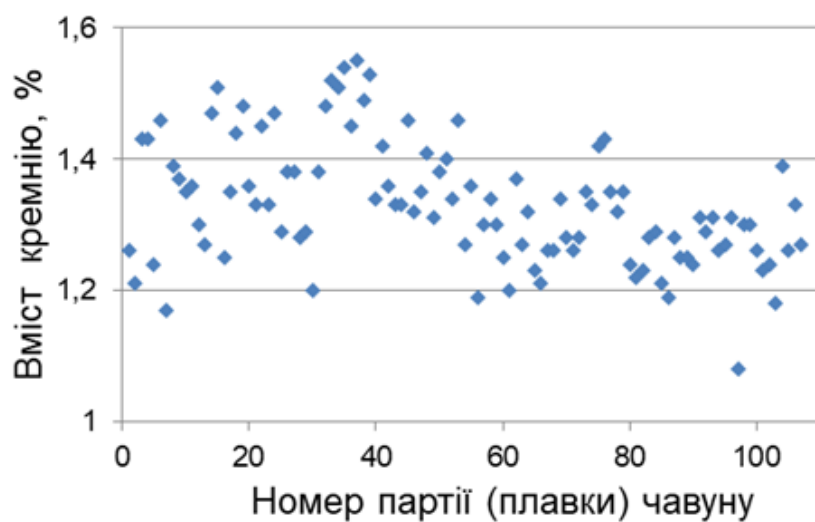
У формулі (3.3), як і в інших, позначення  $Si$  та  $C$  представляють вміст цих елементів у відсотках в хімічному складі чавуну. Відповідно до середніх значень величин вмісту  $Si$ ,  $C$ ,  $P$  у чавуні гальмівних колодок, що наведені у таблиці 3.4, маємо при розрахунках за формулою (3.2)  $S_{\text{евт}} = 0,78$ , за формулою (3.3) –  $S_{\text{евт}} = 0,48$ .

Відповідно до загальноприйнятих суджень чавун гальмівних колодок, результати досліджень якого представлені у таблиці 1.1, відноситься до доевтектичного типу/

Наведений аналіз виконано в основному під кутом зору розширення використання наукових напрацювань в промисловому виробництві литва відповідального призначення із сірого чавуну [52, 57].

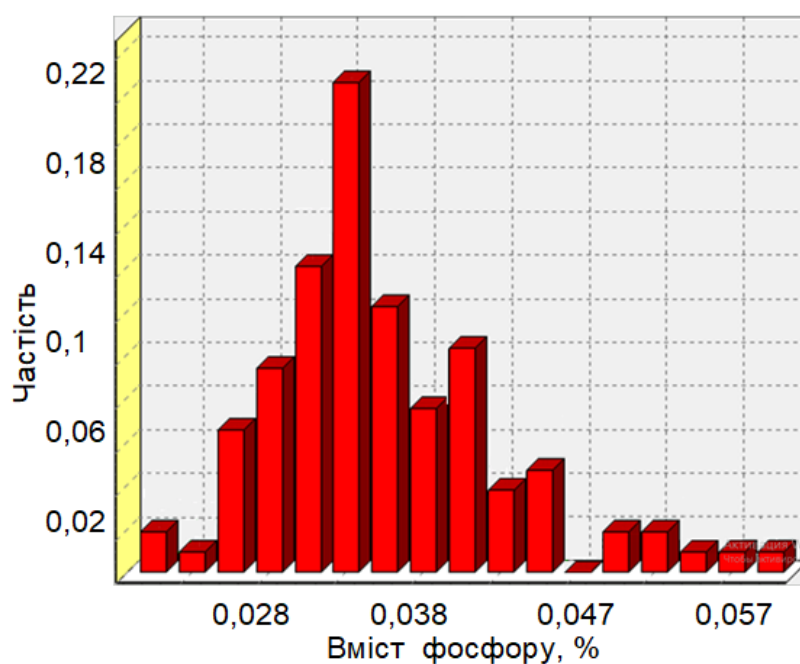


а)

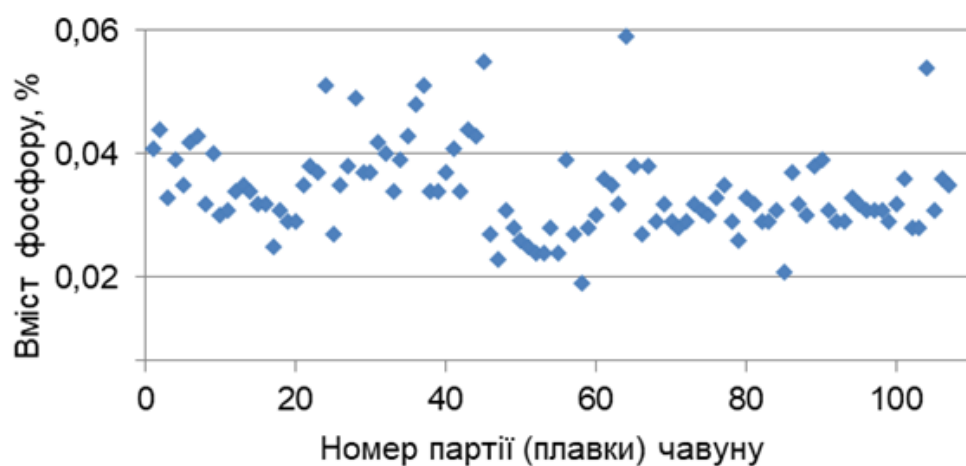


б)

Рис.3.9. Гістограма (а) розподілу вмісту кремнію та його величин (б) в партіях чавуну СЧ350, з якого виготовлені деталі «клин Ханіна»



а)



б)

Рис.3.10. Гістограма (а) розподілу вмісту фосфору та його величин (б) в партіях чавуну СЧ350, з якого виготовлені деталі «клин Ханіна»

Встановлено, що перспективним заходом у напрямі покращення якості гальмівних колодок та «клин Ханіна» для залізничного транспорту, які виробляють з синтетичного сірого чавуну, є прискорення реалізації на практиці термічного деривативного аналізу, що дозволяє експресно і всебічно оцінювати показники його хімічного складу і властивостей [58, 59 та ін.]. Це питання детально розглянуто у розділі 4 дисертації.

Виконаний кореляційний аналіз засвідчив, що твердість гальмівних колодок типу «М» і «клину Ханіна» досліджених партій не корелює ні з вмістом елементів у хімічному складі чавуну, ні з його вуглецевим еквівалентом. Величини вмісту хімічних елементів у чавуні також не корелюють між собою. Величини твердості чавуну, виміряні в двох точках (НВ1 і НВ2) деталей (табл. 3.1–3.3), корелюють. Коефіцієнт кореляції дорівнює 0,894 для гальмівних колодок і 0,664 для «клину Ханіна», що свідчить про достатньо високу стабільність твердості чавуну в цих виробках. Кореляція спостерігалася між вуглецевим еквівалентом  $C_{\text{екв}}$  і ступенем евтектичності  $S_{\text{евт}}$  у синтетичному чавуні досліджених партій (табл. 3.1–3.3). Коефіцієнт кореляції – більше 0,95.

Наведені вище результати досліджень синтетичного чавуну різного призначення підтверджують тезу, що орієнтиром при регулюванні вмісту хімічних елементів чавуну має бути його фактичний склад, встановлений статистичною обробкою даних промислової практики, що в табл. 3.1–3.3, а не інтервали допустимого вмісту елементів, які вказані в стандартах на ливарну продукцію.

Звертаємо увагу, що в табл. 3.1 і 3.3 статистичні характеристики та гістограми на рис. 3.3–3.4 відображають розподіли величин вмісту елементів у хімічному складі чавуну і твердості виробів без будь-якої корекції первинних заводських даних. В таблиці 3.5 для порівняння наведені статистичні характеристики тих самих масивів після фільтрації даних і видалення грубо помилкових значень показників відповідно з процедурою, викладеною в монографії [92].

Наведені в таблиці 3.5 порівняння статистичних характеристик розподілів величин вмісту хімічних елементів у складі синтетичного чавуну свідчать, що видалення з масивів даних грубих помилок суттєво не впливало на загальні результати аналізу. Середні величини вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  майже не змінювалися після очищення даних від випадкових значень. Це позитивна особливість. В той же час, коригування даних показало, що фактичні

діапазони розподілу хімічних елементів у синтетичному чавуні суттєво менші, ніж у первинних даних заводського контролю.

Таблиця 3.5

Статистичні параметри розподілів показників вмісту хімічних елементів, (%) в різних партіях (плавках) чавуну при виготовленні гальмівних колодок і «клин Ханіна» до і після коригування даних шляхом видалення грубих помилок

Елементи	Гальмівні колодки типу «М»		Фрикційний «клин Ханіна»	
<i>C</i>	$\frac{2,76 \dots 3,04}{2,889}$	$\frac{2,85 \dots 2,96}{2,894}$	$\frac{2,75 \dots 3,06}{2,948}$	$\frac{2,89 \dots 3,01}{2,955}$
<i>Si</i>	$\frac{1,04 \dots 1,20}{1,17}$	$\frac{1,14 \dots 1,20}{1,18}$	$\frac{1,08 \dots 1,55}{1,329}$	$\frac{1,17 \dots 1,54}{1,325}$
<i>Mn</i>	$\frac{0,68 \dots 0,96}{0,867}$	$\frac{0,76 \dots 0,96}{0,878}$	$\frac{0,69 \dots 1,01}{0,844}$	$\frac{0,75 \dots 1,01}{0,845}$
<i>P</i>	$\frac{0,61 \dots 0,83}{0,699}$	$\frac{0,61 \dots 0,79}{0,700}$	$\frac{0,019 \dots 0,059}{0,034}$	$\frac{0,023 \dots 0,049}{0,033}$
<i>S</i>	$\frac{0,02 \dots 0,044}{0,031}$	$\frac{0,02 \dots 0,044}{0,031}$	$\frac{0,018 \dots 0,041}{0,030}$	$\frac{0,018 \dots 0,039}{0,029}$

**Примітка.** У чисельнику – мін–макс, у знаменнику – середні значення показників. В перших колонках – показники первинних даних; в других колонках – показники після коригування масивів даних.

Згідно з результатами, наведеними в таблиці 3.5, уточнення первинної інформації дає підстави стверджувати, що в чавуні, з якого виготовлені гальмівні колодки, діапазони розмаху вмісту *C*, *Si*, *Mn* помітно вужчі, ніж за первинними даними. Діапазон вмісту *C* зменшився з (2,76...3,04) до (2,85...2,96), тобто з 0,28 до 0,11 відсотків. Діапазон *Si* – з 0,16 до 0,06; *Mn* – з 0,28 до 0,20. При цьому показники вмісту фосфору і сірки залишаються незмінними. Аналогічні результати отримано і відносно вмісту хімічних елементів у виробах «клин Ханіна». Так, діапазон вмісту вуглецю скоротився від (2,75...3,06) до (2,89...3,01), тобто на 0,19 %.

Таким чином, дані таблиці 1.4 свідчать, по-перше, про відносно високу стабільність вмісту хімічних елементів у синтетичному чавуні для виготовлення литва зазначеного призначення і про відповідність хімічного

складу чавуну вимогам стандартів із врахуванням допустимих відхилень. По-друге, наведені дані надають підстави для рекомендацій щодо зменшення вмісту і діапазонів розподілу окремих хімічних елементів у стандартах на ливарну продукцію, яка досліджувалася. Зокрема зменшення допустимого вмісту сірки з 0,20 до 0,05 %. По-третє, практична рекомендація виробникам полягає у доцільності зміщення діапазонів розподілу вмісту  $Si$  та  $Mn$  у складі синтетичного чавуну для гальмівних колодок в бік менших величин.

Ці результати свідчать також про достатню достовірність і надійність даних заводського контролю вмісту елементів у хімічному складі синтетичного чавуну в промислових партіях ливарних виробів з нього.

Стабільність вмісту хімічних елементів у складі синтетичного чавуну характеризують не тільки їх середні значення та діапазони коливань (таблиця 3.3), а й загально визнаний за подібних досліджень – коефіцієнт варіації (відношення середньоквадратичного відхилення до середньої величини показника). Згідно з даними цієї таблиці коефіцієнт варіації вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  у чавуні, з якого були виготовлені гальмові колодки, складав 0,016; 0,027; 0,058; 0,059; 0,185 для первинних даних. Видалення помилкових значень з масивів даних практично не впливало на значення цього коефіцієнту: 0,0098; 0,0155; 0,0446; 0,0515; 0,1943.

Коефіцієнти варіації цих хімічних елементів у складі чавуну для «клин» Ханіна виявилися ще меншими. А саме: 0,017; 0,070; 0,079; 0,210; 0,160 відповідно для первинних даних і 0,013; 0,064; 0,073; 0,167; 0,145 після видалення помилкових значень з вибірки. Аналогічні результати отримані щодо коефіцієнтів варіації твердості НВ гальмівних колодок (0,073–0,084) відповідно до первинних даних і (0,069–0,082) після видалення помилок з масивів вибірок. Перше і друге значення відносяться до масивів величин твердості, заміряних в першій (НВ1) і другій (НВ2) точках колодок (табл. 3.3). Трохи більші значення коефіцієнтів варіації щодо величини міцності на злам колодок: до коригування даних – 0,124, після – 0,128. Усі ці дані



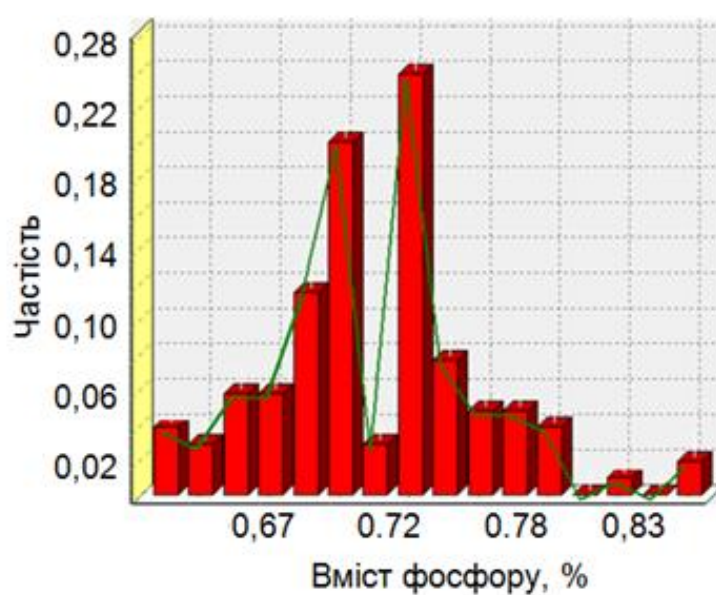
свідчать про достатньо високу стабільність хімічного складу синтетичного чавуну зазначеного призначення і ливарних виробів з нього.

Результати виконаного дослідження не виявили кореляції між величинами вмісту *C*, *Si*, *Mn*, *P*, *S* у синтетичному чавуні, призначеному для виготовлення гальмівних колодок і «клину Ханіна». В цьому полягає основна відмінність синтетичного чавуну від доменного. В монографії [92, с. 81–82], наприклад, підкреслено, що численними дослідженнями встановлено зв'язок вмісту кремнію і сірки в доменному чавуні. Показано також зв'язок коефіцієнтів розподілу кремнію і марганцю, сірки і марганцю, вмісту фосфору і кремнію тощо в доменному чавуні. Суттєві залежності коефіцієнтів розподілу сірки і марганцю від розподілу кремнію, а також вмісту фосфору у доменному чавуні від вмісту кремнію і марганцю представлені на рис. 5, 6 монографії [92]. Зазначені особливості хімічного складу доменного чавуну створюють складнощі при використанні його як шихти для виплавлення ливарного чавуну у вагранках. Небажано високий вміст сірки, відсутність можливості регулювання хімічного складу і складнощі з дотримуванням заданого стандартами вмісту інших елементів в ливарному чавуні при виплавленні його з доменного чавуну призводять до неможливості виготовлення високоякісного литва. Незалежність вмісту кожного хімічного елемента від інших у складі чавуну, виплавленого в індукційних тигельних печах, та коригування вмісту конкретного елемента окремо, безпосередньо у процесі плавки, створюють переваги синтетичного чавуну над ваграночним.

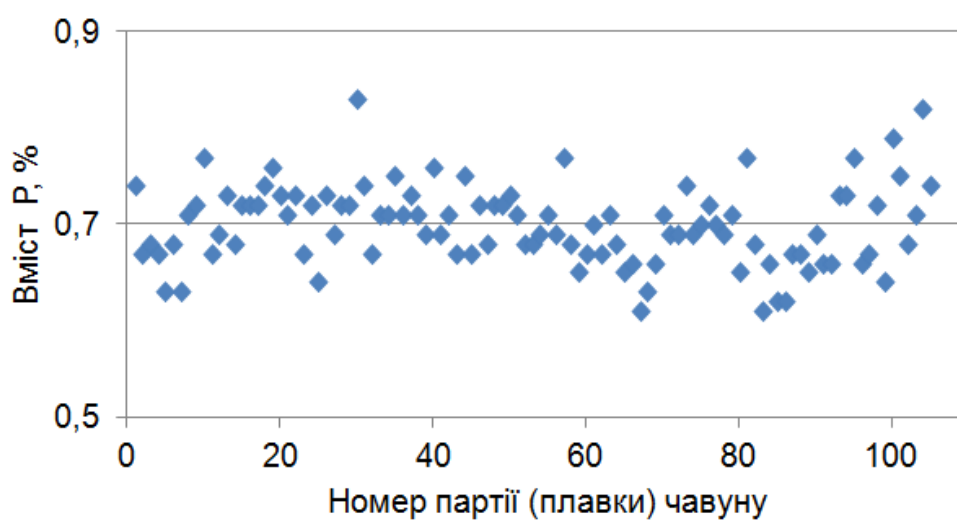
На окрему увагу заслуговує питання впливу очищення масивів первинних даних щодо хімічного складу синтетичного чавуну на гістограми розподілу кожного хімічного елемента. Коригування масивів інформації щодо вмісту хімічних елементів у складі синтетичного чавуну шляхом видалення помилкових значень не тільки уточнює статистичні характеристики, які досліджуються. При цьому змінюються медіана, мода, коефіцієнти асиметрії та ексцесу розподілів. Зазвичай після процедури

виявлення і виключення викидів форма розподілу показників вмісту хімічних елементів в чавуні наближається до класичного нормального вигляду. Але іноді спостерігаються випадки, коли після видалення недостовірних даних з первинних масивів інформації форма гістограм розподілів віддаляється від симетричної, близької до нормального закону Гаусса.

Гістограми розподілу вмісту вуглецю, кремнію, марганцю та відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію в партіях синтетичного чавуну, з якого були виготовлені гальмівні колодки типу «М» для рухомого складу залізниці, що представлені на рис. 3.1–3.4, побудовано на базі масиву первинних заводських даних без будь-якої їх корекції. Як зазначено вище, гістограми розподілу цих показників не повною мірою відповідають нормальному закону Гаусса чи будь-якому іншому закону розподілу випадкових величин. Вплив видалення 26 помилкових значень з масиву 105 первинних даних на гістограму розподілу вмісту фосфору в синтетичному чавуні гальмівних колодок показано на рис. 3.11–3.12. Коригування масиву первинних даних наблизило розподіл вмісту фосфору в синтетичному чавуні до нормального закону Гаусса.

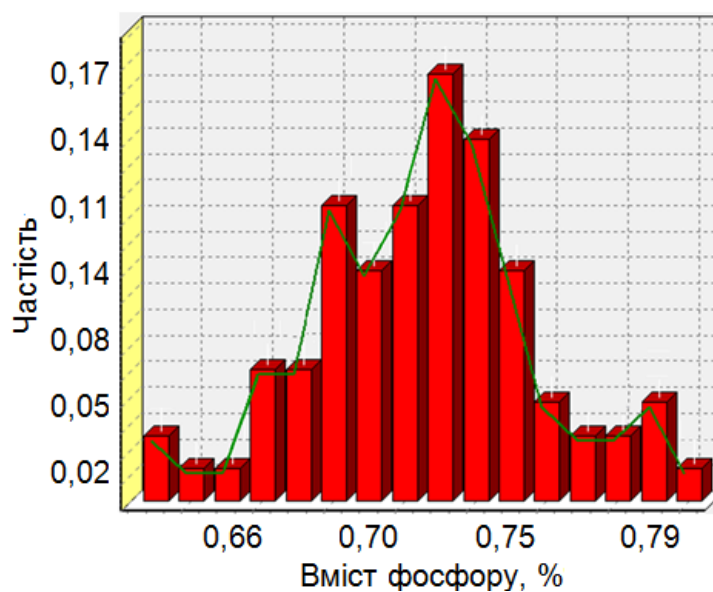


а

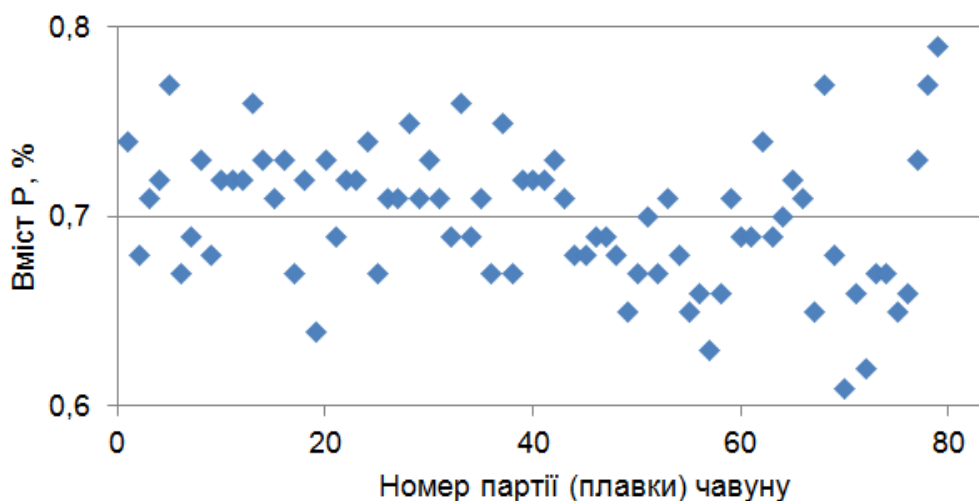


б

Рис. 3.11. Гістограма (а) і розподіл величини (б) вмісту фосфору, побудовані на базі первинних масивів даних, в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М»



а

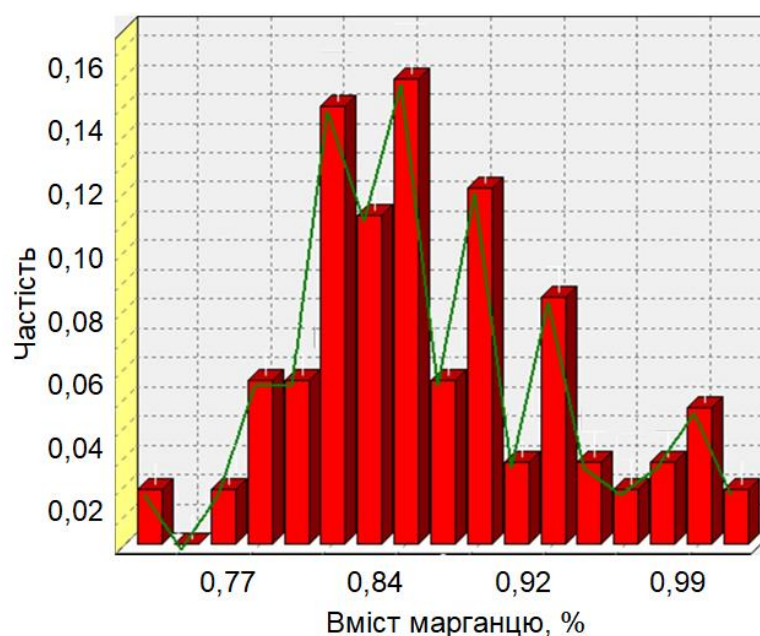


б

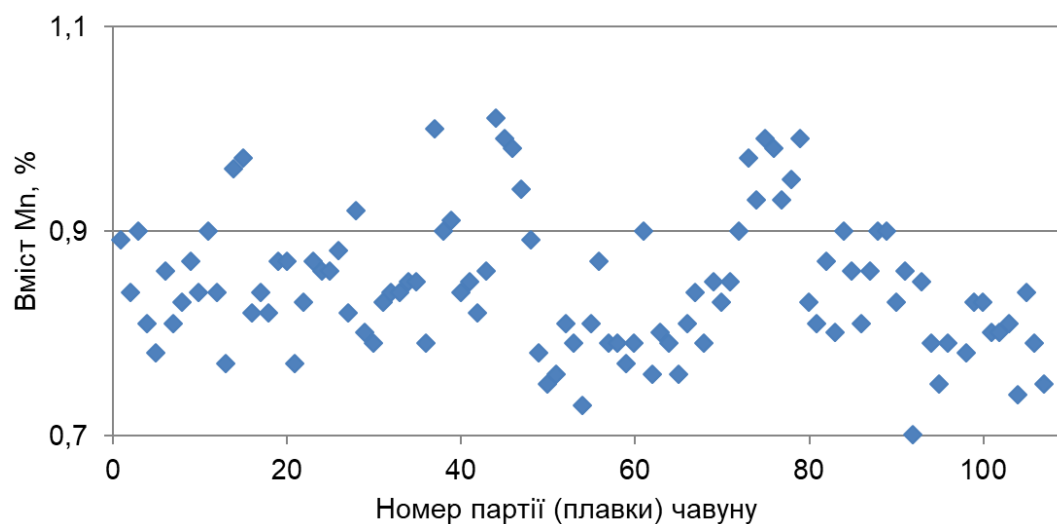
Рис. 3.12. Гістограма (а) розподілу вмісту фосфору і його величини (б) після видалення помилкових значень з масивів даних, в партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М»

Аналогічні результати отримані також внаслідок коригування масивів даних щодо вмісту хімічних елементів у складі синтетичного чавуну в партіях «клину Ханіна». Приклад впливу коригування вибірки вмісту марганцю у складі синтетичного чавуну, призначеного для виготовлення «клину Ханіна», надано на рис. 3.10–3.11. Вхідний масив даних складався з 107 величин  $Mn$ . Після видалення з вибірки значень, визнаних помилковими, залишилося 85 величин. Середнє, мінімальне і максимальне значення вмісту

$Mn$  зазнали незначних змін (табл. 3.5). Ексцес, медіана, мода в результаті коригування даних майже не змінилися і складали відповідно 3,047; 0,830; 0,790, в той час, як асиметрія збільшилася з 0,500 до 0,773. Ця тенденція відображена на гістограмах (рис. 3.13–3.14).

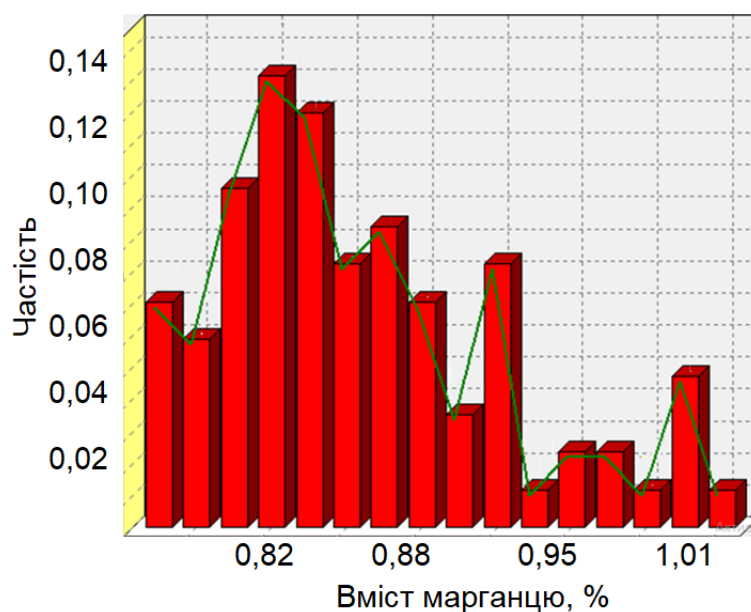


а

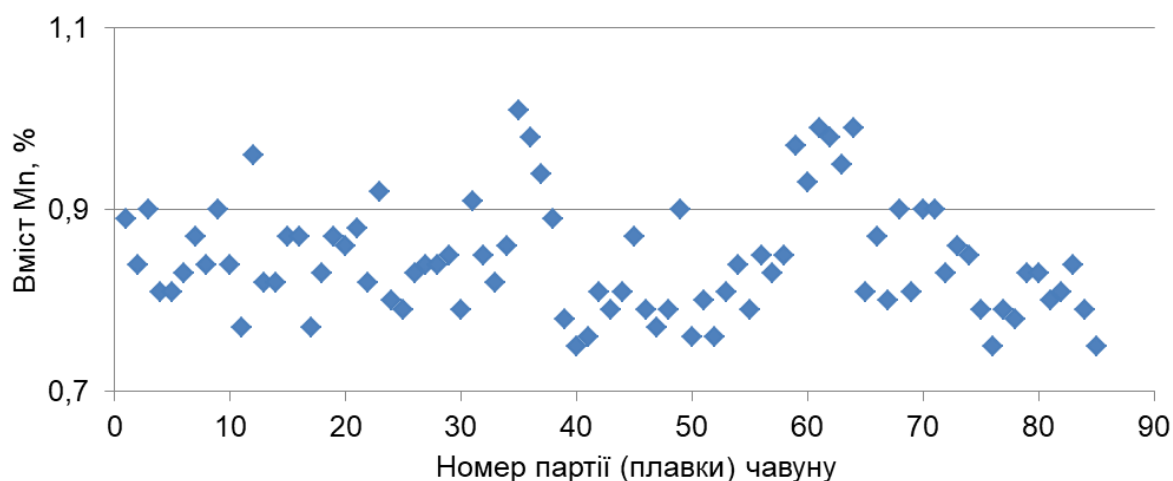


б

Рис. 3.13. Гістограма (а) і розподіл величини (б) вмісту марганцю, побудовані на базі первинних масивів даних, в партіях чавуну, з якого виготовлені вироби «клин Ханіна»



а



б

Рис. 3.14. Гістограма (а) розподілу вмісту марганцю і його величини (б) після видалення помилкових значень з масивів даних, в партіях чавуну, з якого виготовлені вироби «клин Ханіна»

Для оцінки і прогнозування механічних властивостей чавунів та експлуатаційних характеристик гальмівних колодок використовують вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$  і ступінь евтектичності  $S_{\text{евт}}$  чавуну. Спираючись на досвід авторів статей [48-53], для розрахунку вуглецевого еквівалента вибрали наступні, найбільш розповсюджені в дослідницькій практиці, формули.

Відповідно до ГОСТ 27772-88 «Прокат для будівельних сталевих конструкцій» вуглецевий коефіцієнт  $C_{\text{екв}}$ , % визначається за формулою:

$$C_{\text{екв}} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Si}{24} + \frac{Cr}{5} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cu}{13} + \frac{V}{14} + \frac{P}{2} \quad (3.5)$$

Тут і надалі  $C$ ,  $Mn$ ,  $Cr$ ,  $Ni$ ,  $Cu$ ,  $V$ ,  $P$  – масові частки вуглецю, марганцю, кремнію, хрому, нікелю, міді, ванадію, фосфору, мас.,%. Зазначимо, що ця формула не враховує вплив вмісту сірки ( $S$ , мас.,%) на вуглецевий еквівалент.

Нагадаємо, що хімічний склад чавуну для виготовлення гальмівних колодок типу «М» локомотивів за вимогами ГОСТ 30249-97 повинен відповідати таким нормам, мас.,%:  $C = 2,7...3,4$ ;  $Si = 0,7...1,0$ ;  $Mn = 0,4...0,9$ ;  $P = 0,4...0,9$ ;  $S$  – не більше 0,20. Допустимі відхилення, мас.,% елементів:  $C \pm 0,1$ ;  $Si \pm 0,2$ ;  $Mn \pm 0,1$ ;  $P - 0,1$ ;  $S + 0,02$ . Наявність та визначення вмісту в чавуні колодок барію чи кальцію не обов'язково. Згідно з вимогами цього стандарту твердість чавунної гальмівної колодки марки «М» має відповідати 229-302 НВ. Враховуючи, що у складі чавуну для колодок «М» за вимогами ГОСТ 30249-97 не контролюється вміст  $Cr$ ,  $Ni$ ,  $Cu$ ,  $V$  і  $S$ , то наведену вище формулу для розрахунку вуглецевого еквівалента далі розглядатимемо у спрощеному вигляді, без зазначення цих елементів:

$$C_{\text{екв}1} = C + 0,17 Mn + 0,04 Si + 0,5 P. \quad (3.6)$$

Для розрахунку вуглецевого коефіцієнта чавунів запропоновано також наступну формулу [17]:

$$C_{\text{екв}2} = C + 0,3 Si + 0,33 P - 0,015 Mn + 0,26 S. \quad (3.7)$$

Автори статті [45] при вивченні залежності відбілу чавуну від вуглецевого коефіцієнта використовували формулу (3.4.) для його розрахунку:

$$C_{\text{екв}3} = C + 0,3 Si + 0,33 P - 0,03 Mn + 0,40 S. \quad (3.8)$$

Представлені формули (3.5)–(3.6) для розрахунку вуглецевого коефіцієнта сталі та чавуну відрізняються одна від одної незначно. Формули (3.6)–(3.7) запропоновані для оцінки властивостей чавунів, тоді як формула (3.5) – для визначення якості прокату з легованих сталей. Зауважимо, що

формула (3.5) не враховує впливу сірки на вуглецевий еквівалент сталі, але вплив фосфору в ній виражений у 1,5–2 рази сильніше, ніж у формулах (3.6) та (3.7). Коефіцієнт впливу кремнію майже в  $\sim 10$  разів менше, а марганець, згідно з (3.5), впливає на  $C_{\text{екв}}$  протилежним чином, ніж за формулами (3.6) та (3.7). Незважаючи на те, що обидві формули  $C_{\text{екв}2}$  і  $C_{\text{екв}3}$  призначені для оцінки хімічного складу та властивостей чавунів, вони відрізняються більшими величинами коефіцієнтів при відсотковому вмісті  $Mn$  та  $S$  у формулі (3.8).

Згідно з [49], вуглецевий еквівалент чавуну можна розраховувати також за формулою  $C_{\text{екв}4} = C + 0,3 Si + 0,3 P$ . Ця найпростіша формула нібито враховує зміщення фігуративної точки сплаву на подвійній діаграмі залізо-вуглець під впливом домішок, зокрема кремнію та фосфору.

На жаль, в технічній літературі не вказані діапазони застосування наведених вище формул для розрахунку вуглецевого еквівалента і оцінки показників якості різних чавунів.

Аналізуючи наведені формули для розрахунку вуглецевого коефіцієнта чавунів, звертаємо увагу, що вміст фосфору збільшує  $C_{\text{екв}}$  й відповідно до всіх формул його вплив показаний як практично однаковий – коефіцієнти перед  $P$  дорівнюють 0,3 або 0,33. Вплив  $Mn$  на  $C_{\text{екв}}$  чавунів дуже слабкий. Тому у формулі  $C_{\text{екв}4}$  вміст  $Mn$  не враховується. Близькі за величиною (0,26 та 0,40) значення коефіцієнтів відображають вплив  $S$  на  $C_{\text{екв}}$ .

Нижче представлені результати експериментальних досліджень стабільності якості відповідальної ливарної продукції, а саме гальмівних колодок типу «М» для локомотивів, отримані статистичною обробкою даних щодо хімічного складу, твердості та міцності синтетичного чавуну 100 промислових плавок, виробленого на заводі ТОВ «М-ЛИТ». Параметри розподілу вмісту (мас.%,) хімічних елементів, вуглецевого коефіцієнта, твердості HB за двома вимірами, руйнівного навантаження (міцності) при випробуваннях на злам колодок (тс) представлені в таблиці 3.6.



Таблиця 3.6

Статистичні характеристики показників вуглецевого еквівалента, розрахованого за різними формулами, твердості НВ і міцності на злам чавунних колодок типу «М» виробництва заводу «М-ЛИТ»

Параметри розподілів	Величини $C_{\text{екв}}$ , %				Твердість НВ	Міцність, тс
	$C_{\text{екв}1}$	$C_{\text{екв}2}$	$C_{\text{екв}3}$	$C_{\text{екв}4}$		
Середні значення	3,43	3,47	3,46	3,45	251/261	17,5
Мінімальні	3,52	3,33	3,33	3,13	229/229	13,0
Максимальні	3,62	3,64	3,63	3,63	302/302	21,7

**Примітка:** Показники розподілу вмісту хімічних елементів у чавуні гальмівних колодок представлені у таблиці 3.5.

Аналіз даних, наведених у таблиці 3.6 та на гістограмі (рис. 3.15), дозволяє зробити наступні висновки.

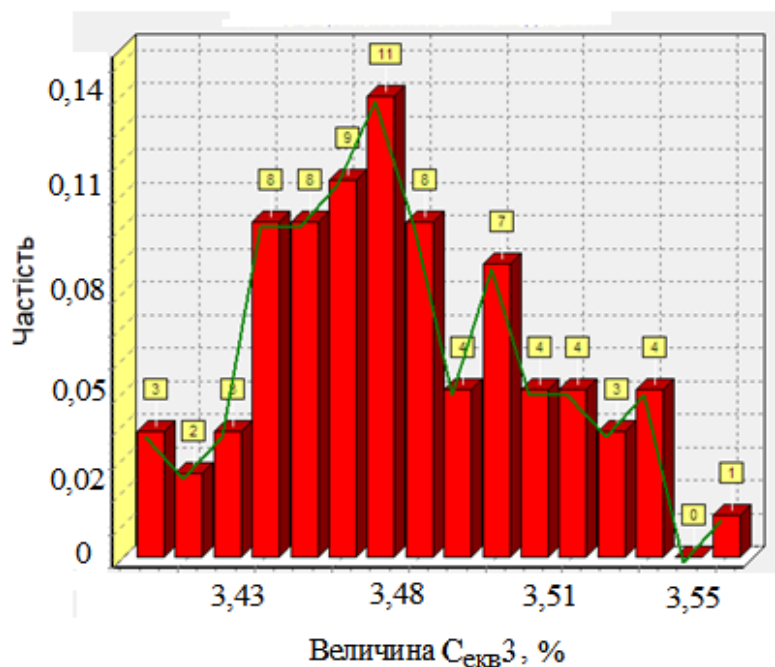


Рис. 3.15. Гістограма розподілу величини вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}3}$  у партіях чавуну, з якого виготовлені гальмівні колодки типу «М»

Значення вуглецевого еквівалента, розрахованого за різними формулами, дуже близькі. Ця обставина дозволяє зробити висновок, що в дослідницькій практиці можна застосовувати всі зазначені вище формули для розрахунку  $C_{\text{екв}}$ . Представлені результати дають підставу стверджувати, що технологія виплавки синтетичного чавуну для гальмівних колодок локомотивів, яку застосовують нині на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ», є надійною з позицій забезпечення вимог ГОСТ 30249-97 до хімічного складу чавуну і дозволяє ставити питання щодо посилення їх у стандартах для виключення випадків надходження споживачам неякісної продукції.

Отримані результати свідчать, що вимоги ГОСТ 30249-97 до вмісту хімічних елементів у складі чавуну нині не є надмірно жорсткими для умов його виплавки в індукційних тигельних печах. Тому є можливості мінімізувати витрати на шихту (металобрухт, феросплави, карбюризатори) та регулювання по ходу плавки хімічного складу чавуну з метою зменшення витрат на виготовлення ливарних виробів. У цьому аспекті перспективним заходом є реалізація в ливарному виробництві методу термічного деривативного експрес-аналізу (ТДА) стану рідкого чавуну під час його охолодження після виплавки [58, 59]. Результати дослідження цього методу представлені в розділі 4 даної дисертаційної роботи.

### **3.2. Алгоритм корекції вмісту елементів у хімічному складі чавуну під час виплавлення за результатами його контролю у відібраній з розплаву пробі металу.**

Підкреслимо, що змінні  $E_M$  і  $U_{\Gamma}$  у наведеній вище формулі (2.1) є випадковими величинами. Величини  $q$  і  $E_3$  в кожному випадку доцільно приймати за умовно постійні, достовірність яких визначається точністю апаратури, що застосовується для їх контролю на конкретному підприємстві. Результати експрес-аналізу вмісту  $E_3$  хімічних елементів у розплаві чавуну визначає напрям та обсяг коригування складу чавуну. В розрахунках за формулою (2.1) величина  $E_{\text{ч}}$  необхідного вмісту конкретного елемента у

складі чавуну спочатку задається. Вона є «точкою прицілювання» у процедурі корекції його хімічного складу.

Сутність рішення поставленої задачі відповідно до методології, викладеної в дисертації і наших роботах, включає розрахунки величини  $\Delta q_M$ , передбачає використання методу Монте-Карло [85] і полягає в наступному [9, 15, 19 та ін.].

Потрібно знайти параметри розподілу величини  $\Delta q_M$ , яка фактично залежить від ряду випадкових змінних, перш за все від  $E_M$  та  $U_{\Gamma}$ . Математичне очікування  $M$  випадкової величини  $\Delta q_M$  дорівнює  $M(\Delta q_M) = \Delta \bar{q}_M$ . Тильдою над  $\Delta \bar{q}_M$  та іншими змінними позначені їхні середні значення. В алгоритмі, що пропонується нижче, виконується  $n$  випробувань, в результаті яких отримують  $n$  можливих значень  $\Delta q_M$ . Далі розраховується їх середнє арифметичне  $\Delta \bar{q}_M = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta q_{M_i}$  і приймається  $\Delta \bar{q}_M$  в якості оцінки наближеного значення шуканого числа  $\Delta q_M$ . Середнє квадратичне відхилення  $\sigma$  випадкової величини  $\Delta q_M$  від її середнього значення  $\Delta \bar{q}_M$  розраховується за формулою  $\sigma_{\Delta q_M} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\Delta q_{M_i} - \Delta \bar{q}_M)^2}$ .

У виробничій практиці, як правило, величину  $\Delta q_M$  необхідної кількості додавання в розплав матеріалу, що містить хімічний елемент, якого не вистачає в чавуні, розраховують за формулою (2.1), підставляючи в формулу середні значення з відомих або передбачуваних діапазонів величин  $E_M$  та  $U_{\Gamma}$ . За так звану «точку прицілювання» зазвичай приймають середні значення діапазонів вмісту контрольованих хімічних елементів, регламентованих у стандарті. Тобто величину  $E_{\text{ч.ср}}$ , рівну  $E_{\text{ч.ср}} = (E_{\text{max}} + E_{\text{min}})/2$ , %, де  $E_{\text{max}}$  та  $E_{\text{min}}$  – максимальна та мінімальна величини процентного вмісту контрольованого елемента у складі готового чавуну. Тоді вираз в дужках у формулі (2.1) має вигляд  $(E_{\text{ч.ср}} - E_3)$ , де  $E_3 = E_{\text{замір}}$  – вимірний безпосередньо

під час плавки вміст хімічних елементів, що контролюються. Підставляючи ці середні значення змінних у формулу (2.1), отримують орієнтовне середнє значення величини  $\Delta \bar{q}_M$  кількості матеріалу, яке необхідно додати в розплав масою  $q$ .

Слід відзначити, що на практиці після розчинення доданого матеріалу в розплаві з нього зазвичай відбирають контрольну пробу і ще раз вимірюють вміст хімічних елементів у складі чавуну. Така процедура контролю та коригування хімічного складу розплавленого чавуну не гарантує стовідсоткове попадання в обумовлений стандартом його хімічний склад, оскільки при розрахунку  $\Delta q_M$  за формулою (2.1) використовують тільки середні значення величин  $E_M$  і Уг, але не враховують їх непостійність (нестабільність). Тобто не враховують параметри розподілів цих змінних, не враховують хоча б величини середніх квадратичних відхилень. Це безумовно знижує точність прогнозування кількості необхідного додавання в розплав матеріалу, яким коригують вміст у чавуні елемента, що контролюється. Тому результат такого розрахунку маси добавки  $\Delta q_M$ , що вноситься у розплав для коригування вмісту хімічного елемента у його складі, слід розглядати та приймати як перше наближення *i-того* значення величини  $\Delta q_{M_i}$  серед можливих її значень, де  $i$  – номер варіанта розрахунку  $\Delta q_{M_i}$ ,  $i = 1 \dots N$ ; де  $N$  – кількість циклів розрахунків за змінною  $i$ .

Суть запропонованих в дисертації методології та алгоритму полягає в тому, що при знаходженні величини  $\Delta q_M$  за формулою (2.1) враховується ступінь розкиду, нестабільність значень вхідних змінних, зокрема випадкових величин  $E_M$  та Уг. Відповідно до запропонованої в даній дисертації методології розв’язання поставленої задачі розрахунку  $\Delta q_M$  виконуються шляхом багаторазового повторення чисельного рішення при різних поєднаннях випадково вибраних величин  $E_M$  та Уг із сукупностей, що характеризують їх розподіл. В алгоритмі рішення величини  $E_M$  і Уг вважаються випадковими та в першому наближенні розподіли цих величин

відповідають нормальному закону Гаусса. У базовому прикладі розмах варіювання величини  $E_M$  доцільно на першому етапі розрахунків приймати рівним діапазону вмісту елемента, що розглядається, в матеріалі, який застосовується для корекції його вмісту в розплаві чавуну. А діапазон розподілу величини угару  $U_g$  приймати за даними виробничого досвіду конкретного промислового об'єкту. Хоча, строго кажучи, ця величина є невідомою і залежить від тривалості процесу плавки, який не є постійним, та ряду інших факторів. Зокрема при виплавленні чавуну для виготовлення гальмівних колодок типу «М» в 3-хтонній індукційній тигельній печі ливарного заводу ТОВ «М-ЛИТ» [4, 6–7] на підставі власного виробничого досвіду приймають наступні величини угару елементів із присадок, що додаються в розплав безпосередньо у процесі плавки, %: кремній – 2...3, марганець – 7...10, вуглець – 3...5. В роботі [17] вказані приблизно удвічі більші величини угару зазначених елементів, але стосовно виплавлення сталей в індукційних електричних печах з основною футеровкою.

Результат орієнтовного (в першому наближенні) розрахунку величини  $\Delta q_M$  не показує меж можливого розкиду вмісту елемента  $E_{\text{ч}}$ , що розглядається, в готовому чавуні при цій кількості  $\Delta q_M$ , доданого в розплав коригувального матеріалу, і розташування цього розкиду відносно діапазону, регламентованому в стандарті на продукцію, яка виготовляється з чавуну. В той же час виробничників завжди цікавить відповідь на запитання – яким буде діапазон розкиду можливих значень вмісту контрольованого елемента в чавуні при наявній мінливості вмісту цього елемента в матеріалі, який вони використовують для коригування хімічного складу розплаву? Тобто виробничникам важливо знати хоча б у першому наближенні при  $i = 1$  можливий діапазон ( $E_{\min} \dots E_{\max}$ ) розмаху вмісту елемента, що розглядається, в чавуні після коригування його складу додаванням у розплав кількості  $\Delta q_{M_i}$  коригувального матеріалу за мінливості в ньому величини  $E_M$ , а також мінливості відсотка угару  $U_g$  цього елемента під час плавлення. Інакше висловлюючись, цікавить можливий

діапазон( $E_{q_{\min}} \dots E_{q_{\max}}$ ), одержуваний у першому ( $i = 1$ ) наближенні при введенні у розплав кількості  $\Delta q_{M_i}$  коригувального матеріалу, розрахованого з використанням середніх значень  $\bar{E}_M$  і  $\bar{U}_G$ .

Для оцінки величини цього діапазону ( $E_{\min} \dots E_{\max}$ ) при  $\Delta q_{M_{i=1}}$  формулу (2.1) перетворимо (виразимо) відносно елемента, що контролюється, в готовому чавуні  $E_q$ . Отримуємо

$$E_q = \frac{\Delta q_M E_M (100 - U_G)}{100q} + E_3. \quad (3.9)$$

Вважаючи при  $i=1$  величину  $\Delta q_M$  постійною ( $\Delta q_{M_{i=1}} = \text{Const}$ ) та незмінними значення  $q$  та  $E_3$ , розрахуємо методом Монте-Карло поле розподілу величин  $E_{q_i}$ , при використанні ймовірних значень  $E_M$  та  $E_q = \frac{\Delta q_M E_M (100 - U_G)}{100q} + E_3$ , випадково обраних з їх розподілів. Для реалізації такого підходу організуємо цикл обчислень за змінною  $j$  де  $j=1 \dots K$ . При цьому формула (3.9) набуває вигляду

$$E_{q_{i,j}} = \frac{\Delta q_{M_i} E_{M_{i,j}} (100 - U_{G_{i,j}})}{100q} + E_3 \quad (3.10)$$

При створенні циклу розрахунків  $E_{q_i}$  за змінною  $j$  при  $j = 1 \dots K$  визначимо параметри розподілу (середнє значення  $\bar{E}_{q_i}$ , середнє квадратичне відхилення  $\sigma E_{q_i}$ , розмах варіювання) цієї величини, де  $E_{q_{i,\min}} = \bar{E}_q - 3\sigma E_{q_i}$ ;  $E_{q_{i,\max}} = \bar{E}_q + 3\sigma E_{q_i}$ . Відповідно при  $i = 1$  діапазон варіювання величини  $E_{q_i}$  від мінімального  $E_{q_{i,\min}}$  до максимального  $E_{q_{i,\max}}$  значень становить  $6\sigma E_{q_i}$ . Порівнюємо цей розрахований діапазон з регламентованим стандартом діапазоном величини вмісту в чавуні елемента, що розглядається. Середнє, мінімальне та максимальне значення  $E_q$ , розраховані у першому наближенні але з урахуванням мінливості величин  $E_M$  та  $U_G$  у ймовірнісному аспекті, порівнюємо також з початковими значеннями цих змінних, прийнятими при розрахунку за формулою (2.1) орієнтовної величини  $\Delta q_{M_{i=1}}$ , без урахування непостійності величин  $E_M$  та  $U_G$ . Таке порівняння дозволяє

оцінити допустимість прийняття за основу розрахунку  $\Delta q_{M_{i=1}}$  в першому наближенні.

Варіюючи величинами середніх квадратичних відхилень у розподілах значень  $E_M$  і УГ, можна оцінити вплив мінливості цих величин, насамперед вмісту провідного елемента (наприклад марганцю або кремнію у феросплавах), на стабільність складу виплавленого чавуну. Процедура уточнення необхідної кількості  $\Delta q_M$  матеріалу, що вноситься в розплав для корекції вмісту в ньому конкретного елемента, не передбачає зупинятися в розрахунках на першому наближеному результаті визначення  $\Delta q_{M_{j=1}}$ .

Заплановано продовження розв'язання поставленого завдання до отримання заданої точності результату розрахунку величини  $\Delta q_M$ .

На наступному етапі порівнюються розраховані мінімальне, максимальне та середнє значення  $E_q$  з такими ж показниками вмісту контрольованого елемента, передбаченими в стандарті, оцінюється наскільки ці значення не збігаються і приймається рішення щодо необхідності подальшого уточнення результату розрахунків. Алгоритм спочатку передбачає, що діапазон розкиду величин вмісту конкретного елемента у складі чавуну менше такого діапазону в стандарті. Однак у принципі це припущення має бути обов'язково перевірено. Якщо діапазон ( $E_{q_{max}} \dots E_{q_{min}}$ ), одержуваний в результаті розрахунку при  $\Delta q_{M_{j=1}}$  ширше регламентованого в стандарті діапазону, слід зробити висновок про суттєву нестабільність вмісту елемента, що розглядається, у складі матеріалу та непридатність його для коригування складу чавуну. Аналогічний результат свідчить і про неприпустимість прийнятої у розрахунках величини УГ угару контрольованого елемента під час плавки чавуну.

Знаючи відхилення  $\Delta E_{q_{min}} = (E_{q_{min_{j=1}}} - E_{q_{min}})$  і  $\Delta E_{q_{max}} = (E_{q_{max}} - E_{q_{max_{j=1}}})$  розрахованих мінімальної та максимальної величин  $E_q$  від зазначених у стандарті, можна зміщувати точку прицілювання величини  $E_q$  у

формулі (2.1) ліворуч або праворуч залежно від поставленої мети. Зокрема, залежно від того, у бік більших або менших значень бажано змістити гістограму розподілу величини  $E_{\text{ч}}$  у межах допустимого стандартом діапазону. Рішення в який бік (більших чи менших величин) і наскільки має бути зміщена точка прицілювання, приймається з різних міркувань. Наприклад, для економії матеріалу, який використовується при корекції хімічного складу чавуну, доцільно, щоб значення  $E_{\text{ч}_{\min j}}$  збігалось з величиною  $E_{\text{ч}_{\min}}$  в стандарті. Відповідно, точка прицілювання, якою у формулі (2.1) слугувало середнє значення величини  $\bar{E}_{\text{ч}}$  в передбаченому стандартом діапазоні, повинна бути зміщена у бік більших або менших значень на величину  $\Delta E_{\text{ч}_{\min}}$ . Відповідно при  $j = 2$  змінюється розрахована за формулою (2.1) величина  $\Delta q_M$ . Далі цикл розрахунку  $E_{\text{ч}_{i,j}}$  за формулою (3.10) повторюється тепер вже при  $\Delta q_{M_{j=2}}$ , як і раніше для  $j = 1 \dots K$ . Цикли розрахунків за  $i$  та  $j$  повторюються до досягнення заданої точності величини  $E_{\text{ч}_{i,j}}$ . На рисунку 3.16 представлено фрагмент блок-схеми викладеного алгоритму.

Завершивши цикли розрахунку необхідної кількості матеріалу, що має бути доданий в розплав для корекції вмісту в чавуні першого (домінуючого) елемента, приступаємо до процедури розрахунку за тією ж схемою обсягу добавки у розплав іншого матеріалу, який корегує вміст наступного хімічного елемента. При цьому, якщо визначена маса добавки  $\Delta q_M$  у розплаві матеріалу, що корегує вміст домінуючого елемента в чавуні, є істотною порівняно з масою розплаву  $q$ , то в розрахунках за формулою (2.1) слід врахувати це збільшення маси розплаву і приймати його масу рівною  $q' = q + \Delta q_M$ .

На початку роботи програми користувачем вводяться дані у вікно (рис.3.17), необхідні для розрахунків, а саме: хімічний склад чавуну згідно з вимогами ДСТУ; вміст елементів у складі модифікаторів; початкова маса заправки печі; прийнята кількість статистичних випробувань методом Монте-



Карло; хімічний склад розплаву, визначений за результатами аналізу відібраної з розплаву проби металу тощо (рис. 3.18, блок 1).

При реалізації представленого алгоритму у виробництві на конкретному ливарному підприємстві доцільно і раціонально використовувати накопичений досвід виплавлення чавуну відповідного сортаменту. Алгоритм дозволяє і підтримує таку можливість для підвищення надійності результату розрахунків. Так, на першому етапі при розрахунку за формулою (2.1) величини  $\Delta q_m$  за «точки прицілювання» можна й доцільно приймати не середні значення діапазонів вмісту хімічних елементів, що контролюються, регламентованих у стандартах чи іншій нормативній документації, а значення вмісту елементів у складі чавуну відповідного сортаменту із бази даних цього заводу.

Запропонований алгоритм передбачає також враховувати ефект того, що внесення у розплав певного легуючого матеріалу для коригування конкретного хімічного елемента у складі чавуну може змінити вміст іншого елемента в розплаві. Наприклад, при додаванні у розплав феросиліцію при коригуванні вмісту кремнію одночасно зміниться й вміст марганцю в чавуні. Такий очікуваний вплив враховується спеціальною підпрограмою в алгоритмі, яка на рисунку не представлена.

Слід відзначити, що запропонований алгоритм опосередковано пов'язаний з режимами плавки чавуну. Зокрема спеціальна підпрограма розраховує залежність ступеня угару хімічних елементів у чавуні від температури та тривалості витримки розплаву. При необхідності враховується також ступінь засвоєння легуючого елемента при внесенні коригуючого матеріалу в розплав.

Нинішні можливості комп'ютерної техніки забезпечують миттєве виконання усієї викладеної процедури розрахунків кількості коригуючого матеріалу, який має бути внесений у розплав для досягнення необхідного вмісту конкретного елемента в чавуні.

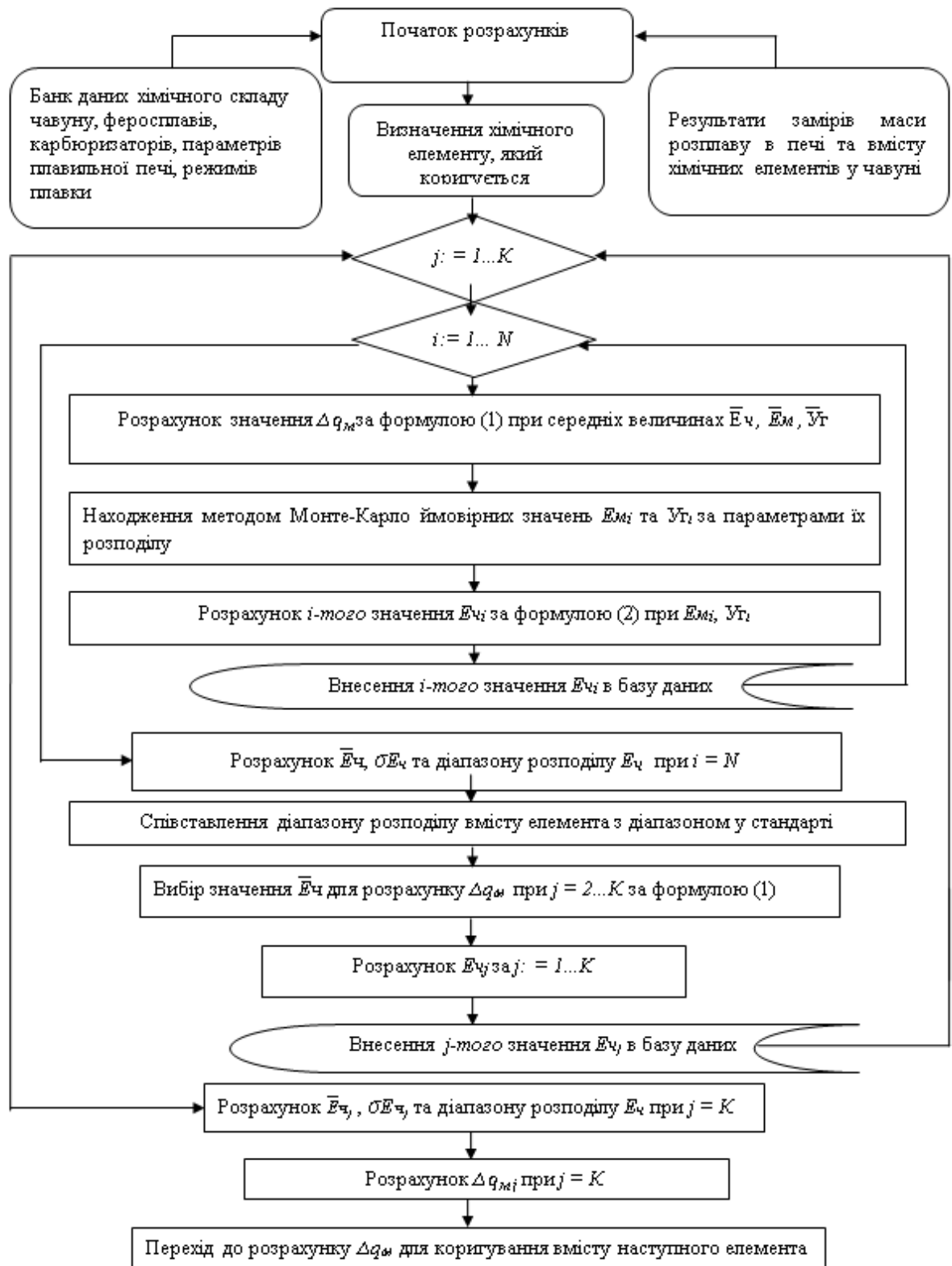


Рис. 3.16. Фрагмент блок-схеми алгоритму розрахунку кількості легуючого матеріалу, необхідної для внесення у розплав чавуну при коригуванні його хімічного складу. Зміст позначень наведено в тексті

### **3.3. Можливості оптимізації процесу регулювання хімічного складу чавуну при його виплавленні.**

В розділі 2 даної дисертації зазначено, що розроблена методологія і розділі 3.1. алгоритм коригування хімічного складу чавуну передбачають визначення «ведучих елементів», «точок прицілювання», «коефіцієнтів вагомості» кожного з хімічних елементів, інших параметрів системи регулювання. В дисертаційній роботі запропоновано власне авторське визначення дефініцій «коефіцієнт вагомості», «точка прицілювання», «домінуючий хімічний елемент», які створюють ідеологію комплексної системи, методики принципово нових рішень, за допомогою яких здійснюється цілеспрямований вплив на хімічний стан і властивості синтетичного чавуну безпосередньо в процесі плавки.

Залежно від вхідних умов, виробничої ситуації на підприємстві, сортаменту ливарної продукції, яка виготовляється, вимог до її якості, параметрів індукційної тигельної печі, наявності сировини, необхідної для виплавлення чавуну, режимів плавки, які застосовуються, інших факторів можливі різні підходи до визначення коефіцієнтів вагомості кожного хімічного елемента в складі чавуну. Зокрема, при визначенні коефіцієнтів вагомості (впливу, значущості) хімічних елементів у чавуні, призначеному для виготовлення деталей залізничного транспорту (гальмових колодок, «клину Ханіна» тощо), під час регулювання їх вмісту у розплаві запропоновано орієнтуватися на один чи декілька наступних пріоритетів.

1. Складність забезпечення вимог стандарту щодо необхідної точності контролю та регулювання вмісту хімічного елемента в чавуні.

2. Вплив вмісту хімічного елемента в складі чавуну на його структуру (розміри і форму включень графіту та ін.), властивості (твердість, міцність), експлуатаційні характеристики (коефіцієнти тертя, зносостійкість) тощо.

3. Техніко-економічні показники використання різних матеріалів для коригування вмісту конкретного елемента в чавуні. А саме їх вартість, витрати на застосування при формуванні шихти і безпосередньо у процесі

плавки чавуну. Стосовно шихти – то оцінку витрат на закупівлю більш якісної й, відповідно, вартісної сировини. Тобто витрат, пов'язаних із закупівлею та використанням різних феросплавів та їхньою ціною на ринку.

4. Застереження щодо ризиків, пов'язаних з можливим непопаданням (невідповідністю) одного конкретного чи декількох хімічних елементів у складі чавуну в діапазон значень, регламентований стандартом на ливарну продукцію. Це застереження стосується умов, коли корекція хімічного складу чавуну відбувається безпосередньо в процесі плавки на підставі результатів контролю вмісту хімічних елементів у пробі металу, відібраної з розплаву.

Найбільшим ризиком, скоріше за все, слід вважати перевищення вмісту будь-якого хімічного елемента в чавуні, яке потребує зливу певної частки розплаву, щоб створити умови для продовження корекції складу рідкого металу шляхом внесення у розплав додаткової порції металобрухту чи іншої сировини.

З урахуванням ступеню важливості кожного елемента у чавуні за критерій оптимальності доцільно приймати середньозважену похибку його хімічного складу, отриманого в результаті корекції розплаву і доводки чавуну до певної кондиції відносно заданих «точок прицілювання». Похибка визначається з урахуванням коефіцієнту вагомості кожного елемента у складі чавуну згідно з попередньою оцінкою його важливості у виробництві конкретної продукції. Тобто відхилення (похибка) по кожному хімічному елементу помножується на відповідний коефіцієнт вагомості. Далі розраховується середнє значення. Коефіцієнти вагомості нормуються. Сума усіх коефіцієнтів по хімічним елементам у чавуні, які контролюються, дорівнює одиниці. Зазначений критерій оптимальності має вигляд:

$$K_{\text{опт}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} p_i \cdot \varepsilon_i, K_{\text{опт}} \leq [K_{\text{опт}}],$$

де,  $K_{\text{опт}}$  – критерій оптимальності процесу корекції хімічного складу чавуну або складу шихти; – відхилення вмісту  $E_i$   $i$ -того елемента від «точки прицілювання»  $E_{\text{ч}}$ , яким є бажаний вміст елемента в чавуні,  $\Delta E_i = |E_{\text{ч}} - E_i|$ ;

$\varepsilon_i$  – похибка розрахунку,  $\varepsilon_i = \frac{\Delta E_i}{E_q}$ ;  $\rho_i$  – коефіцієнт вагомості *i-того* хімічного елемента у складі чавуну. Величини  $E_q$ ,  $E_i$ ,  $\Delta E_i$  визначені у відсотках;  $n$  – кількість елементів у чавуні (шихті), які враховуються в аналізі;  $[K_{\text{опт}}]$  – припустиме значення критерію оптимальності. Значення критерію  $[K_{\text{опт}}]$  регулюється вибором величин  $\rho_i$  і  $\varepsilon_i$ ;  $[K_{\text{опт}}] \rightarrow 0$  при  $\varepsilon_i \rightarrow 0$ .

В результаті використання наведеного критерію оптимальності здійснюється перевірка попадання вмісту хімічних елементів, які контролюються у складі чавуну, в їх діапазони, що регламентовані стандартом на продукцію.

Отримана інформація про наявність чи відсутність похибки в хімічному складі розплаву чавуну дозволяє технологу обґрунтовано приймати рішення про закінчення процесу плавки або в разі невідповідності отриманого значення критерію оптимальності  $K_{\text{опт}}$  продовжити корекцію вмісту хімічних елементів. Водночас в разі непопадання в заданий діапазон вмісту будь-якого важливого, на погляд технолога, елемента він має можливість внести корективи у значення коефіцієнтів вагомості елементів і повторити процедуру оптимізації. Алгоритмом передбачається можливість уточнення точок прицілювання при регулюванні вмісту хімічних елементів і значень коефіцієнтів вагомості, а також можливість заміни матеріалів, які використовуються для корекції складу розплаву чавуну, на більш ефективні.

Стосовно запропонованого вище критерію оптимальності  $K_{\text{опт}}$  підкреслимо, що завдяки застосуванню коефіцієнтів вагомості критерій  $K_{\text{опт}}$  набуває властивості ще й показника економічної ефективності поряд з його іншими перевагами. Наприклад, порівняно з критерієм оптимальності у вигляді мінімальної вартості шихти [62, с. 159]. За точки прицілювання при корекції вмісту конкретних хімічних елементів у чавуні приймаються значення вмісту елементів, попередньо вибрані виходячи з технологічних, економічних чи будь-яких інших міркувань [9, 64, 93].

### 3.4. Комп'ютерна програма «Alloyage» моделювання процесу регулювання хімічного складу розплаву чавуну в залежності від типу та хімічного складу модифікатора.

Програмне забезпечення чисельного моделювання процесу регулювання хімічного складу чавуну в залежності від типу і хімічного складу модифікатора створено відповідно до методології, викладеної у розділі 2.1 дисертації, та алгоритму, запропонованому на рис 3.16. Структурно програма складається з головного вікна (рис. 3.17), конфігураційних файлів програми та файлів, що включають в себе параметри компонентів шихти. Головне вікно програми включає в себе всі інструменти, необхідні для проведення розрахунків.

**Корекція об'ємів добавок легуючих елементів**

**Сплав**  
 Маса, %   
 Точність

	Min	Max
C	2,7	3,4
Si	0,7	1,0
Mn	0,4	0,9
P	0,4	0,9
S	0,01	0,2

**Модифікатор**

%	Mn(min)	Mn(max)	Si(min)	Si(max)
1	75	82	6,0	6,0

**Заміри**  
 C  % S  %  
 Si  % P  %  
 Mn  %

**Прицілювання, %**

**Кількість ітерацій**

**Елемент, що коригується**  
☒ Mn ☐ Si

Рис. 3.17. Головне вікно програми для моделювання процедури коригування (регулювання) хімічного складу розплаву чавуну, яка передбачає врахування нестабільності хімічного складу компонентів шихти [19]

Визначальними вхідними даними, що задаються вручну оператором для початку роботи програми є: хімічний склад чавуну; вміст елементів у складі модифікатора матеріалу, який використовують для коригування складу розплаву у печі; початкова маса загрузки печі; хімічний склад розплаву за результатами заміру у відібраний з розплаву пробі; точка прицілювання щодо відсоткового вмісту елемента, який коригується;

кількість статистичних випробувань методом Монте-Карло при моделюванні процедури коригування хімічного складу розплаву; точність розрахунків.

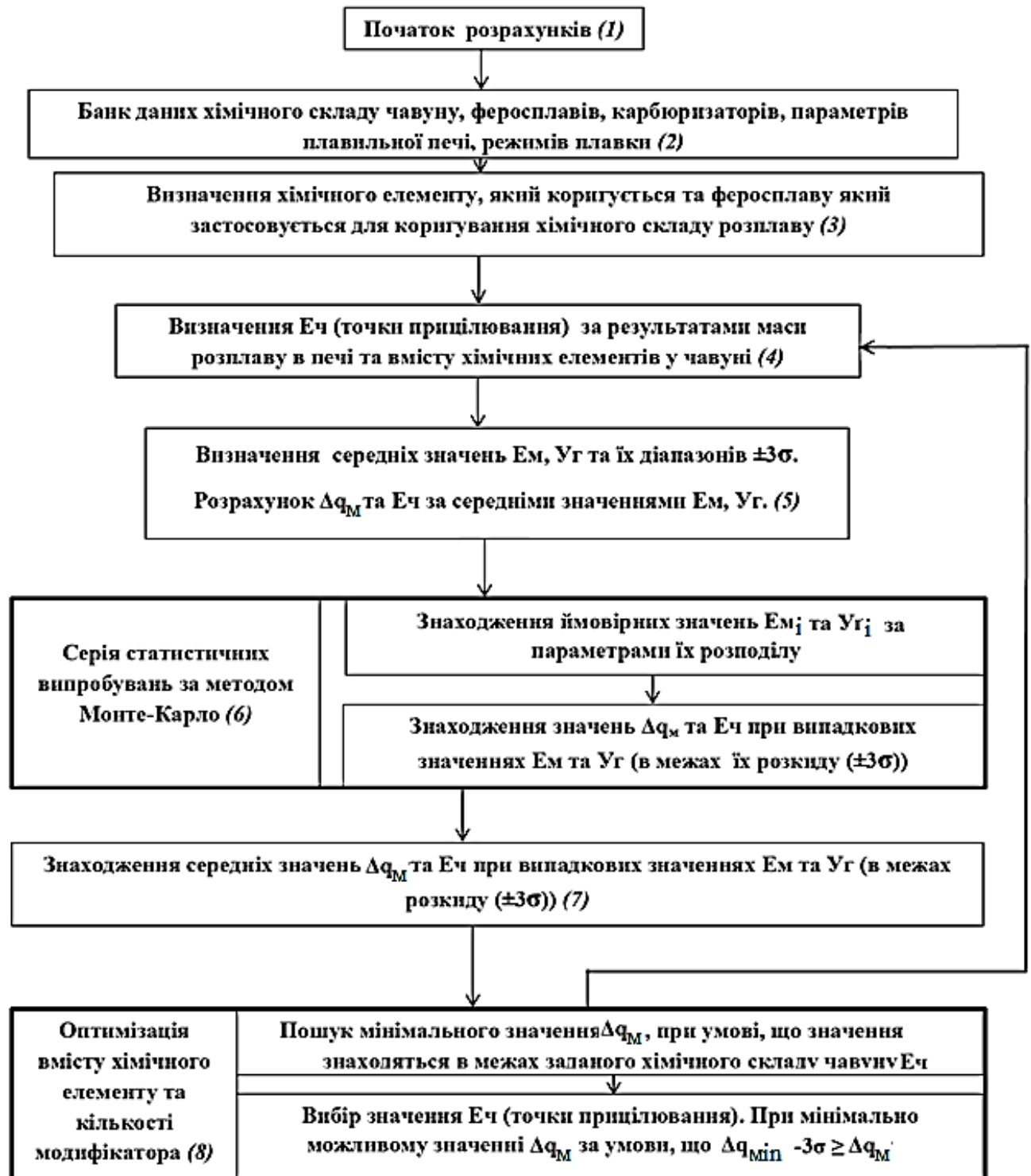


Рис. 3.18. Фрагмент алгоритму роботи програми [19]

Програма працює в інтерактивному режимі. Робота з програмою зводиться до виконання користувачем наступних дій за розробленим алгоритмом (рис 3.18).

Внесення хімічного складу чавуну та модифікатора здійснюється при допомозі спеціально сформованих файлів, які вміщуються у базі даних.

**а**

\*СЧ 350\_.dat – Блокнот

Маса, кг; 3000,00  
Точність розрахунків; 0,01

Вміст елементу за нормативним документом, %

Назва елементу	Позначення	Min	Max
Марганець;	Mn;	0,4;	0,9
Фосфор;	P;	0,4;	0,9
Сірка;	S;	0,01;	0,2
Кремній;	Si;	0,7;	1,0
Вуглець;	C;	2,7;	3,4

**б**

\*ФМн\_78.dat – Блокнот

Вміст елементів у феросплаві та величина угару, %

Марганець Mn;		Кремній Si;		Величина угару	
min;	max;	min;	max;	min;	max;
75,0;	82,0;	1,0;	6,0;	1,0;	3,2

Рис. 3.19. Файли для внесення початкових даних: а) дані щодо вмісту хімічного складу сплаву, який виплавляється згідно з вимогами стандарту на готову продукцію; б) значення діапазонів варіювання відсоткового вмісту елементів у модифікаторі та величини угару, % [19]

Зазначені конфігураційні файли мають модифіковану структуру csv [19]. Дані що містяться у них, а саме, всі елементи розділені знаком «;», а знак «.» використовується для відділення десяткової частини чисел (рис. 3.19). Перший файл alloy.dat (рис. 3.19, а) містить в собі дані щодо хімічного складу сплаву, який виплавляється.

Перші два рядки містять початкову масу завантаження печі та задану точність розрахунків, наприклад 0,01 (рис. 3.19, а), яка буде визначати кількість ітерацій при моделюванні із застосуванням методу Монте-Карло процедури розрахунку маси добавки модифікатора, необхідної для внесення у розплав. Інші – скорочені та повні назви хімічних елементів у складі



сплаву, %, їх мінімальні та максимальні величини. Другим конфігураційним файлом є `modifier.dat` (рис. 3.19, б), який містить значення діапазонів варіювання відсоткового вмісту елементів у модифікаторі та величини угару елемента у процесі плавки (у алгоритмі на рис. 3.18 це блок 1). За допомогою таких файлів створюються бази даних модифікаторів, металобрухту, феросплавів, що є в наявності на підприємстві. Слід зазначити, що у програму закладена можливість використовувати діапазони вмісту хімічних елементів та відсоткової величини їх угару в усіх шихтових матеріалах, які будуть застосовуватись для виплавки чавуну (феросплавах, металобрухті, звороті власного виробництва, графітізаторах тощо).

Після внесення даних у вікно робочої програми та порівняння вмісту хімічних елементів у розплаві за даними хімічного аналізу проби, відібраної з розплаву, і відповідними вимогами нормативних документів (стандартів, технічних умов) автоматично або оператором (рис. 3.18, блок 4) обираються елементи, які потребують коригування шляхом введення у розплав відповідних модифікаторів (рис. 3.18, блок 5). Кожному такому елементу присвоюється певний «коефіцієнт вагомості». Це детально описано у нашій роботі [9].

Маса добавки  $\Delta q_M$ , яка вноситься в розплав для корекції його хімічного складу в першому приближенні приймається, наприклад, за середніми значеннями діапазонів вмісту хімічних елементів, зазначених у нормативному документі (стандарті) на чавун, що виплавляється. Аналогічно приймаються у першому наближенні орієнтовні величини вмісту елементів у складі модифікатора та угару.

Відповідно до «коефіцієнта вагомості» кожного хімічного елемента у складі сплаву, визначеного технологом, проводиться ранжування модифікаторів та згідно із поставленою задачею щодо мінімізації кількості застосованого модифікатора чи його вартості, або оптимізації хімічного складу розплаву, задається «точка прицілювання»  $E_q$  (рис. 3.18, блок 4).

Зазвичай на першому етапі розрахунків маса коригуючої добавки  $\Delta q_M$  визначається за умови прийняття значень всіх змінних на рівні середніх величин (рис. 3.18, блок 6). При цьому величина  $E_q$  – використовується у якості так званої «точки прицілювання». У процесі моделювання процедури коригування хімічного складу «точка прицілювання»  $E_q$  буде змінюватись і, відповідно, впливати на масу добавки  $\Delta q_M$  на кожному етапі розрахунків. Приймаючи значення  $E_M$  та  $U_g$  за випадкові величини (в межах заданих діапазонів), шляхом ітерацій із застосуванням методу Монте-Карло визначаються межі можливого розкиду величин  $\Delta q_M$  (рис. 3.18, блок 7).

Наступні етапи розрахунків проводять у вигляді послідовного коригування маси внесення у розплав відповідних шихтових матеріалів (модифікаторів) з обчисленням зміни вмісту елементів у складі розплаву. Тобто після кожного циклу розрахунків проводиться перевірка вмісту всіх елементів у складі розплаву на їх відповідність вимогам стандарту та виводяться на екран розподіли випадкових величин, що входять до рівняння (3.2). Зауважимо, що, починаючи із другого етапу розрахунків, після початкового «прицілювання» за середніми величинами, застосовується метод Монте-Карло стосовно визначення величин угару, вмісту хімічних елементів у модифікаторах, які використовуються при коригуванні розплаву. Враховуючи отримані розподіли зазначених змінних, оператор може задати нову «точку прицілювання» відповідно до поставленої задачі або скористатись рекомендованою. Зміщуючи «точку прицілювання» залежно до результатів попередніх розрахунків та цілей поставленої задачі (мінімізації кількості модифікатора, що використовується, або оптимізації хімічного складу розплаву) визначається маса  $\Delta q_M$  внесення його у розплав, при якій вміст усіх елементів ( $E_{q_i}$ ) у розплаві знаходяться в діапазонах, згідно з прийнятою точністю розрахунків (рис. 3.18, блок 8 та рис 4). Розрахунок маси  $\Delta q_M$  добавки, що необхідно ввести у розплав чавуну, ведеться доти, поки вміст елемента, який коригується, буде знаходитися у межах, регламентованих стандартом на готову продукцію. Наприкінці розрахунків

на екрані у робочому вікні програми може висвітися коментар: «вихід за ліву або праву границю діапазону» (рис. 3.1, 6). У цьому випадку необхідно повернутись до попереднього розрахунку. Визначена попередньо величина  $\Delta q_M$  і буде шуканим результатом.

На наступному кроці роботи програми виконується перехід до процедури корекції наступного хімічного елемента у хімічному складі розплаву чавуну із застосуванням відповідного модифікатора і т. ін. Моделювання процедури коригування хімічного складу розплаву чавуну завершується, коли в результаті розрахунків діапазони вмісту всіх хімічних елементів у розплаві знаходяться в межах, заданих стандартом.

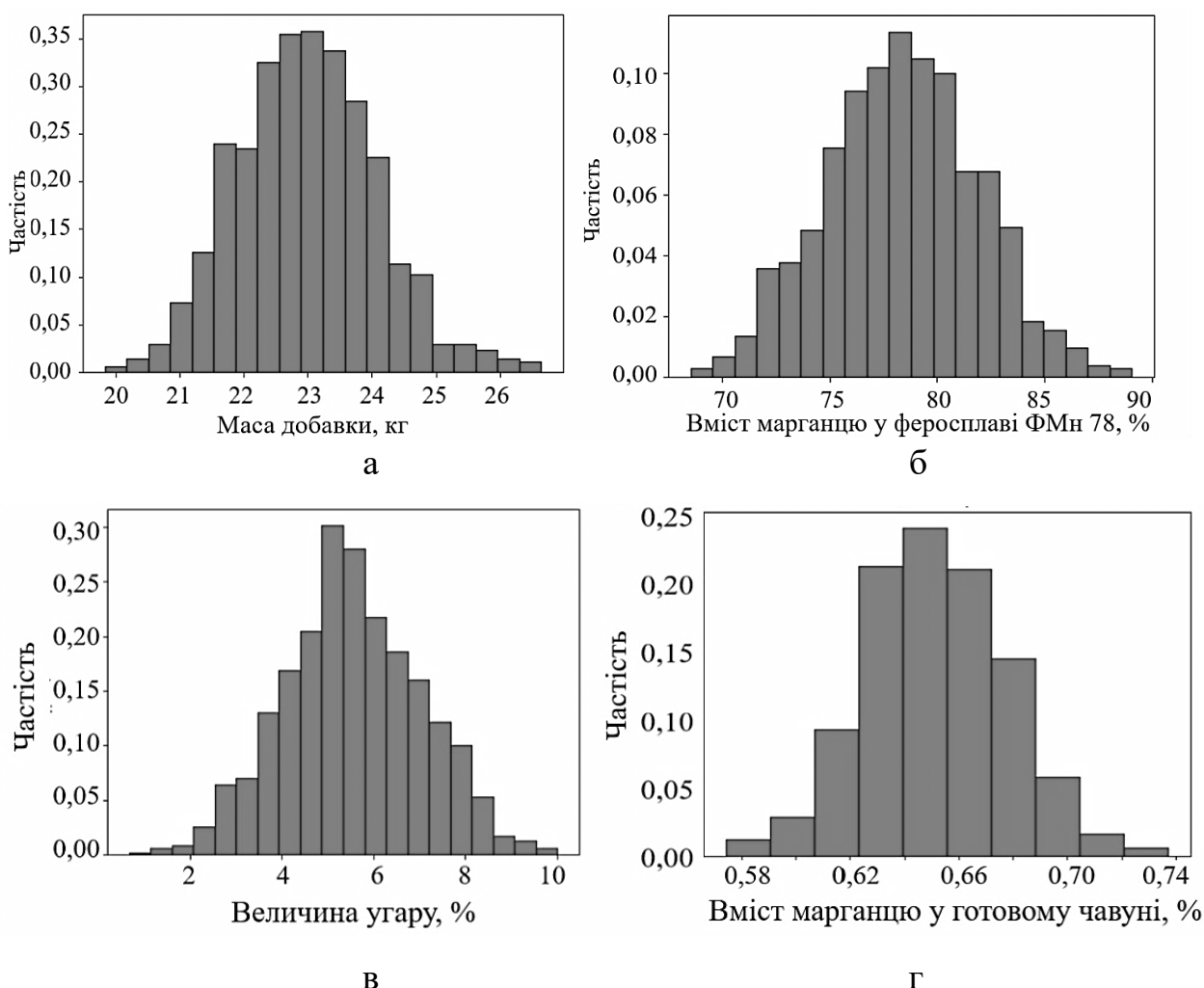


Рис. 3.20. Типові гістограми, отримані в результаті моделювання процедури коригування вмісту хімічних елементів у складі розплаву чавуну на прикладі коригування вмісту марганцю за викладеною вище програмою.

Позначено: а) розподіл маси добавки феромарганцю у першому прицілюванні 0,65%; б) розподіл вмісту марганцю в феромарганці ФМн78; в) розподіл величини угару  $Mn$  у розплаві чавуну; г) розподіл вмісту марганцю в чавуні після коригування розплаву [19].

Для апробації викладеного підходу щодо вирішення поставленої задачі та випробовування роботи програми було обрано наступний контрольний приклад. Маса завантаження печі – 3000 кг; кількість варіантів статистичних випробувань із застосуванням методу Монте-Карло – 1000; діапазон величини угару елемента у процесі плавки (7...10) %. Масові долі елементів у готовому чавуні складають, %мас.:  $C$  – (2,7...3,2),  $Mn$  – (0,4...0,9);  $Si$  – (0,7...1,0);  $S$  – (0,02...0,2);  $P$  – (0,4...0,9). Модифікатори – феромарганець ФМн78 згідно з ДСТУ 3547-97.

Таблиця 3.7

Результати мінімізації маси добавки феромарганцю у розплаві чавуну по рекомендованим точкам прицілювання вмісту марганцю у готовому чавуні [19]

	Перше «прицілю- вання» за середнім значенням	Друге «прицілю- вання»	Третє «прицілю- вання»	Четверте «прицілю- вання» (оптимальн е значення)	П'яте «прицілю- вання» (вихід за ліву границю)
	I	II	III	IV	V
Точки прицілю- вання вмісту $E_{ch}$ марганцю у чавуні, %	0,65	0,58	0,53	0,48	0,44
Величина маси добавки $\Delta q_M$ , кг феромарга- н-цю у розплав	22,97	20,44	18,10	15,93	14,40

При коригуванні вмісту марганцю початкову точку прицілювання прийняли посередині діапазону  $Mn=0,65$  %. Результати заміру хімічного складу проби, відібраної з розплаву, %:  $C=3,0$ ;  $Mn=0,1$ ;  $Si=0,4$ ;  $P=0,02$ ;  $S=0,01$ .

Типові гістограми розподілу величин  $\Delta q_M$ ,  $E_c$ ,  $E_M$ ,  $U_T$ , що входять як змінні до зазначеного рівняння (3.1), отриманих в результаті коригування вмісту марганцю у складі розплаву чавуну, наведено на рис. 3.20.

В таблиці 3.7 наведено результати моделювання процедури коригування маси добавки феромарганцю у розплав чавуну по рекомендованим програмою точкам прицілювання.

Згідно з даними таблиці 3.7 розв'язок задачі розрахунку маси добавки феромарганцю у розплав чавуну за запропонованим алгоритмом (за рекомендованими точками прицілювання) дозволяє значно (з 22,97 до 15,93, тобто на  $\sim 7$  кг, на  $\sim 30$  %) зменшити масу добавки модифікатора у розплав порівняно з результатом розрахунків за середнім значенням. Зазначимо також, що вже на четвертій ітерації досягається мінімальне значення величини  $\Delta q_M$ . Отже, викладена програма забезпечує розрахунок мінімально необхідної величини  $\Delta q_M$ . Послідовність роботи програми за вищезазначеною методикою наведена на рис 3.21.

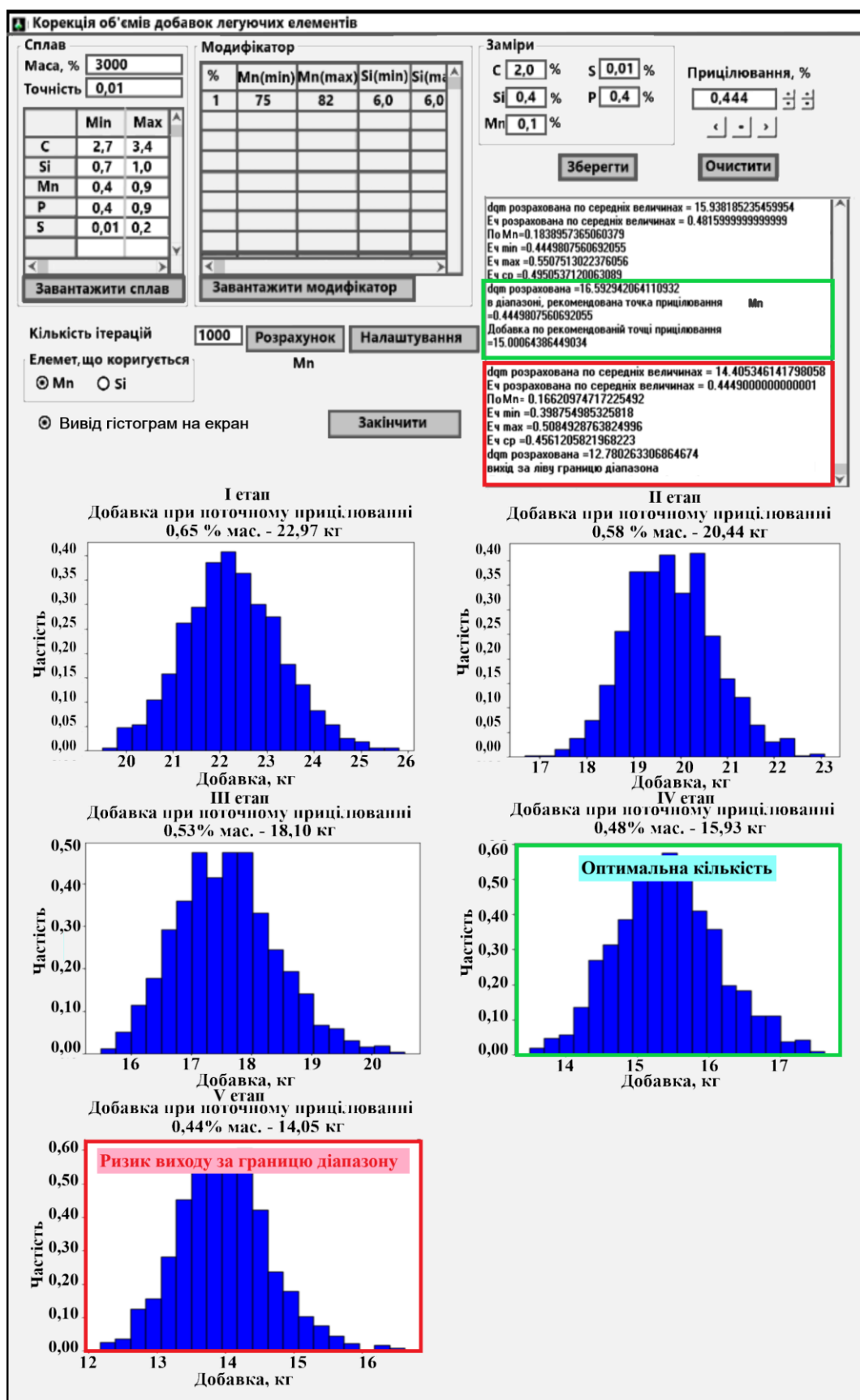


Рис. 3.21. Поетапна робота програми моделювання процедури розрахунку маси шихтового матеріалу (феромарганцю ФМн 78), необхідного для коригування вмісту марганцю у розплаві для отримання заданого хімічного складу готового чавуну [19]

Таким чином, розроблені методологія, алгоритм та комп'ютерна програма дозволяють виконувати ефективне моделювання процедури коригування усіх елементів у металевому розплаві, які регламентовані нормативними документами на готову ливарну продукцію. Забезпечується визначення мінімальної кількості модифікаторів, необхідної для внесення у розплав при врахуванні нестабільності вмісту основних елементів у модифікаторах. Застосовані методика і розроблена комп'ютерна програма виключають небезпеку виходу величин вмісту хімічних елементів у складі чавуну за межі діапазонів, регламентованих стандартом на готову продукцію.

### **Висновки до розділу 3.**

Представлено результати досліджень величини вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності і відношення  $C/Si$  хімічного складу синтетичного чавуну, який використовують для виготовлення гальмівних колодок і «клину Ханіна» рухомого складу залізниці.

Порівняння статистичних характеристик розподілів первинних даних з характеристиками, отриманими після видалення із первинної інформації сумнівних значень показників, засвідчило також надійність методики контролю вмісту хімічних елементів у складі чавуну в умовах промислового виробництва. Середні значення вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  залишаються майже незмінними. Діапазони розташування значень вмісту цих елементів у складі чавуну після уточнення первинних даних скориговуються на  $\sim (0,1...0,2) \%$ .

Показано, що при виплавленні в індукційних тигельних печах сірого синтетичного чавуну, призначеного для виготовлення гальмівних колодок і «клину Ханіна», діапазони варіювання вмісту  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$  значно вужчі, ніж регламентовані стандартами на цю ливарну продукцію. Відмічена принципова можливість внесення відповідних уточнень до вимог стандартів відносно вмісту хімічних елементів у синтетичному сірому чавуні, призначеному для виготовлення гальмівних колодок типу «М» і фрикційного

«клину Ханіна» для рухомого складу залізниці, зокрема зменшення вмісту сірки до 0,05 % для підвищення стабільності його якості.

Розроблено комплекс поглядів, уявлень, ідей, спрямованих на удосконалення методик регулювання хімічного складу синтетичного ливарного чавуну безпосередньо в процесі плавки. Удосконалена методика, система контролю і регулювання хімічного складу чавуну при його виплавленні, які враховують у ймовірному аспекті нестабільність матеріалів, що додаються у розплав при коригуванні вмісту в ньому конкретних хімічних елементів за результатами експрес-аналізу проб металу, відібраних з розплаву. Застосовано метод Монте-Карло для врахування в ймовірнісному аспекті нестабільність хімічного складу матеріалів, які використовують при регулюванні вмісту хімічних елементів у чавуні. Розроблено алгоритм визначення необхідної кількості легувального матеріалу для внесення у розплав при коригуванні вмісту конкретного хімічного елемента в складі чавуну. Запропоновано раціональну послідовність прийняття рішень у процедурі розрахунків кількості легуючого матеріалу, необхідного для додавання у розплав.

Підготовлено комп'ютерну програму для реалізації зазначених методології і алгоритму, який у процесі свого розвитку передбачає виконання додаткових вимог щодо розташування гістограми вмісту конкретного хімічного елемента поблизу верхньої або нижньої меж його діапазону, регламентованому в стандарті на продукцію, що виробляється. Передбачає також можливість врахування угару і ступеню засвоєння легуючих хімічних елементів у розплаві в залежності від його температури і тривалості витримки. Запропоновано підходи до визначення «домінуючого» елемента та «точок прицілювання» при корекції хімічного складу чавуну. Ведучі (домінуючі) хімічні елементи потребують першочергової корекції при наявності відхилень їх вмісту відносно стандартизованих нормативів.

Розроблено критерій оптимальності процесу коригування хімічного складу чавуну при його виплавленні, який передбачає застосування



«коефіцієнтів вагомості» вмісту кожного хімічного елемента у складі чавуну і дозволяє враховувати як їх вплив на якість литва, так й на техніко-економічні показники виробництва. Запропоновано при виплавленні чавуну, призначеного для виготовлення зазначених ливарних виробів надавати найбільші коефіцієнти вагомості кремнію і марганцю. Рекомендовано прогнозувати ступінь угару елементів у процесі плавки чавуну і враховувати цей прогноз ще на стадії формування шихти. Визначено орієнтовний склад шихти для виплавлення синтетичного чавуну відповідного призначення і порядок завантаження шихтових матеріалів в індукційні тигельні печі.

Ймовірнісний характер процесу виплавлення чавуну і виготовлення з нього литва потребує відповідного підходу до моделювання процедури розрахунку шихти і регулювання вмісту хімічних елементів у складі розплаву в печі. Розроблена і реалізована у вигляді базових алгоритму і комп'ютерної програми методологія розрахунку шихти і коригування відсоткового вмісту хімічних елементів у розплаві чавуну безпосередньо в процесі плавки, яка враховує у ймовірнісному аспекті, із застосуванням методу Монте-Карло нестабільність хімічного складу шихтових матеріалів. Переваги запропонованого підходу перед іншими методиками полягають у можливості на будь-якій стадії моделювання процедури визначення складу шихти оцінювати результат розрахунку не тільки шляхом контролю попадання середніх величин вмісту кожного з хімічних елементів у регламентовані стандартом чи технічними умовами на чавун діапазони, а й за відповідністю очікуваних полів розкиду ймовірних величин вмісту елементів діапазонам, передбачених цими нормативними документами. Викладену методику, що передбачає застосування методу Монте-Карло, доцільно використовувати також як другий етап після, наприклад, розрахунку складу шихти методом підбору чи будь-яким іншим способом, для посилення надійності остаточного результату.

Враховуючи можливість кількісної залежності властивостей готових ливарних виробів від узагальнених показників хімічного складу чавуну, з

якого виробу виготовлені, запропоновано використовувати в якості критеріїв оптимізації у алгоритмах і програмах розрахунку складу шихти величини вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності чавуну. Розроблена методологія дозволяє виявляти ефекти і закономірності, непередбачувані в рамках відомих підходів і рішень.

## РОЗДІЛ 4

### РОЗВИТОК МЕТОДУ ТЕРМІЧНОГО ДЕРИВАТИВНОГО АНАЛІЗУ (ТДА) ЯКОСТІ РІДКОГО СІРОГО ЧАВУНУ

В розділах 2 та 3 даної дисертаційної роботи представлено результати удосконалення методики, системи контролю і регулювання хімічного складу ливарного чавуну безпосередньо в процесі його плавки у тигельних індукційних печах. Ефективність контролю якості чавуну посилюється, якщо наряду з корекцією хімічного складу контролюється і його властивості при охолодженні розплаву в процесі лиття виробів. Наприклад, важливими показниками для таких виливків, як «клин Ханіна» та гальмівні колодки, є твердість, пластичність, коефіцієнт тертя тощо. Жоден із існуючих методів аналізу, окрім термічних методів, не може оперативного прогнозувати ці показники. Такі можливості має метод термічного деривативного аналізу (ТДА) хімічного складу і властивостей чавуну. Метод термічного експрес-аналізу у різних варіантах його виконання відомий вже понад 90 років [76]. Його використовують для експрес-контролю хімічного складу і властивостей ливарного чавуну. В Україні цей метод знаходиться на стадії удосконалення та підготовки до реалізації на практиці.

Термічний деривативний аналіз [94] заснований на фіксації критичних температур на кривій охолодження рідких чавунів, які залежать в основному від комплексного впливу основних легуючих елементів, а саме *C*, *Si*, *Mn*. Для фіксації вказаних температур використовують аналіз термічних кривих охолодження із розрахунком першої та/або другої похідних. Тому при уточненні підходу щодо обробки даних, які отримують термічним аналізом, його називають деривативним [50, 57–59, 64 - 84]. ТДА забезпечує надійний результат оцінки хімічного складу чавуну та структури виливків. Саме тому розвиток науково-технологічних засад і вдосконалення методу ТДА якості рідкого чавуну є актуальною темою.

При виконанні дисертаційної роботи у процесі вдосконалення методу термічного деривативного аналізу (ТДА) вирішили низку науково-технічних

задач методологічного плану, у тому числі: дослідили вплив умов виготовлення зразків на відтворюваність та однорідність їх металографічної структури; розробили алгоритми та програми математичної обробки результатів термічних кривих охолодження залізовуглецевих сплавів; удосконалили конструкції засобів експресного контролю хімічного складу сплавів; здійснили верифікацію розроблених засобів та методів експресного контролю хімічного складу сірого чавуну.

#### **4.1. Результати дослідження чавунів як об'єктів експресного термічного контролю.**

Авторкою дисертації у співавторстві з колегами проаналізовано теплофізичні процеси кристалізації чавунів, а також під керівництвом Е.В. Захарченко розроблено алгоритми макро- та мікрокінетики затвердіння чавунів, засновані на інтерпретації кривої охолодження, яка відображає мікроструктуру чавунів [95].

В розділі 1.5 даної роботи зазначено, що у дослідженнях процесів кристалізації методом ТДА визначають характеристичні (конфігуративні) точки, які фіксують температури початку та закінчення процесу кристалізації вилівка при охолодженні. Тобто на шкалі часу термічної кривої охолодження (ТКО) та референсної кривої охолодження (РКО) визначають тривалість кристалізації металу від температури ліквідусу  $T_L$  до температури солідусу  $T_S$ . Весь часовий діапазон кристалізації між цими температурами на кривих ТКО та РКО, що порівнюються, розділяють на  $n$  пар рівновіддалених контрольних точок, наприклад  $n = 1000$ . Далі, порівнюючи температуру  $T_{li}$  на кривій ТКО з температурою  $T_{2i}$  на кривій РКО, визначають міру подібності ТКО до найближчої еталонної РКО із наявної бази референсних кривих охолодження для кожної пари  $i$ -тих точок (індекс «1» застосований відносно ТКО, індекс «2» – відносно РКО; далі по тексту також).

В роботах [58, 78] та інших наших публікаціях проаналізовано способи оцінювання збіжності експериментально отриманої термічної кривої

охолодження ТКО до найближчої референсної кривої РКО. Перший спосіб ТДА розплаву чавуну передбачає розрахунок кількісної міри подібності форми кривих охолодження зразків чавуну, який підлягає аналізу, та накопичених в електронній базі референсних (довідкових) кривих із заздалегідь визначеними властивостями за формулою:

$$\bar{\Omega} = \frac{1}{n} \left| \sum_{i=1}^{i=n} (T_{1i} - T_{2i}) \right| \quad (4.1)$$

де  $\bar{\Omega}$  – критерій (ступінь) близькості (подібності) кривих ТКО та РКО;  $T_{1i}$  та  $T_{2i}$  – температури в кожній  $i$ -тій парі точок на цих кривих;  $i = 1 \dots n$ , де  $n$  – кількість пар контрольних точок на кривих, що порівнюються.

Другий спосіб оцінювання подібності кривих охолодження ТКО і РКО, заснований на застосуванні формули (4.2), зовнішньо схожий на перший, але кардинально відрізняється по суті. У цьому способі подібність кривих ТКО та РКО визначають показником  $\bar{Z}$ , який визначається за формулою:

$$\bar{Z} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} |T_{1i} - T_{2i}|, \quad (4.2)$$

Величина  $\bar{Z}$  являє собою абсолютну середньоарифметичну різницю температур кривих охолодження, що аналізуються, та референсних під час затвердіння розплаву. Чим менша величина критерію  $\bar{Z}$ , тим більш подібна форма двох порівнюваних кривих [57, 96–98]. Коли значення критерію  $\bar{Z}$  є мінімальним або дорівнює нулю, то криві ТКО і РКО, що порівнюються, становлять найбільш подібну або абсолютно подібну по формі пару і у цій парі кривих властивості чавунів вважаються однаковими.

Ці два способи принципово відрізняються тим, що за формулою (4.1) розраховують модуль суми різниць температур на кривих ТКО та РКО. А у формулі (4.2) – фігурує «сума модулів різниць» [97]. Основний недолік першого способу і формули (4.1) полягає у тому, що при використанні цієї формули не виключені випадки, коли розрахована величина  $\Omega$  може дорівнювати нулю при тому, що криві ТКО і РКО не співпадають, а навпаки значення  $T_{1i}$  та  $T_{2i}$  в  $i$ -тій точці часового інтервалу суттєво різняться. Водночас, знак «мінус» чи «плюс» величини  $\Omega$ , розрахованої за формулою

(4.1), свідчить про те, в бік більших чи менших значень температур зміщена крива ТКО відносно РКО. Недоліки першого способу розглянуто більш ретельно в наших патентах [97–98] та інших роботах.

Необхідно зазначити, що другий із розглянутих способів ТДА також має недоліки. Зокрема, цей спосіб і формула (4.2) не враховують той факт, що однакова ступінь відхилення ТКО від РКО може по різному впливати на результат оцінки хімічного складу та властивостей зразків чавуну, які досліджуються. Причина цього полягає в тому, що у різних періодах по часу охолодження зразків, в різних температурних інтервалах (в різних точках  $i$ ) на кривій охолодження, затвердіння та кристалізації розплаву однакові за абсолютною величиною відхилення температури від оптимальної впливають по-різному на мікроструктуру і властивості чавуну. Цей ефект не враховують розглянуті способи, формули (4.1), (4.2) та інші подібні. В результаті при одній і тій самій величині  $\bar{Z}$ , яка розрахована з використанням формули (4.2), показники властивостей зразків чавуну, що порівнюються, можуть істотно відрізнятися.

В патентах [97–98] відзначено, що відомими способами ТДА ігнорується сильна теплова різниця етапів первинної та евтектичної кристалізації чавуну. Зазначений та усі інші етапи включені в аналіз, як рівнозначні. В дійсності, на етапі кристалізації із розгляду первинного аустеніту виділяється 51 кДж/кг латентної (прихованої) теплоти кристалізації, а на етапі кристалізації стабільної евтектики (графіт + евтектичний аустеніт) – 179 кДж/кг, тобто в 3,5 рази більше [58]. Така значна різниця тепловиділення прискорює проходження теплового фронту затвердіння первинного аустеніту крізь спай термопари та викликає відповідне зниження температури, а значить і збільшення величини  $\bar{Z}$  при розрахунках за формулою (4.2).

Спосіб ТДА рідкого чавуну [97–98], який враховує викладені вище нюанси процесу кристалізації чавуну, включає використання для термічного аналізу тільки ділянку евтектичного затвердіння чавуну, а ділянку первинної

кристалізації із розгляду виключається. До суттєвих недоліків вказаного способу можна віднести те, що при його застосуванні, втрачається значний обсяг інформації, яку несуть в собі криві охолодження. Цей підхід можна використовувати лише при умові, що криві охолодження зразків чавуну, які порівнюються, жорстко співпадають за типом чавуну. Вагомість впливу даної ділянки затвердіння сірого чавуну та інших ділянок кривої охолодження необхідно оцінювати додатково.

На підставі результатів виконаних досліджень для удосконалення методики та способів ТДА, з метою підвищення їх інформативності запропоновано ввести в аналіз термічних кривих охолодження коефіцієнт впливу  $K_i$ , який має враховувати різний вплив на структуру та механічні властивості чавуну різних температурних етапів кристалізації, що відображені на відповідних ділянках кривих охолодження.

Величини коефіцієнта впливу  $K_i$  для кожної ділянки на кривій ТКО визначаються, виходячи з технологічних міркувань відносно суттєвості впливу саме цієї ділянки на одну чи декілька властивостей чавуну. Розташування будь-якої ділянки фіксується номерами індексу  $i$ . Вибір кількості ділянок, їх розташування та тривалість відносно координатної вісі, фіксуючої час охолодження зразка чавуну на ТКО, мають ґрунтуватися на результатах досліджень впливу параметрів процесу охолодження чавуну конкретного хімічного складу на його структуру, механічні властивості тощо в різні періоди охолодження.

Висновки і пропозиції призводять до наступного вдосконалення другого з названих способів ТДА і формули (4.1):

$$\bar{Z}_u = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^{i=n} |K_i(T_{1i} - T_{2i})| \quad (4.3)$$

де  $K_i$  – коефіцієнт впливу температури  $T_{1i}$  в  $i$ -тих точках на кривій ТКО.

Очевидно, що використання формули (4.3) посилює можливості ТДА. Для застосування цієї формули необхідно, по-перше, вирішити питання

визначення чисельних величин коефіцієнтів  $K_i$  для різних температурних інтервалів на кривій ТКО. По-друге, потрібно обґрунтувати граничні значення показника  $[\bar{Z}_u]$  для чавуну конкретного хімічного складу, сортаменту. Розрахована за формулою (4.3) величина показника  $\bar{Z}_u$  не повинна перевищувати його граничне значення  $[\bar{Z}_u]$ .

Підкреслимо, що формула (4.3) за своєю сутністю принципово відрізняється від формули (4.4), запропонованої в наших патентах [99–100]:

$$\bar{Z}_u = \sum_{i=1}^{i=n} (T_{1i} - T_{2i})/n \pm t_{\alpha}(n) \cdot \sigma \quad (4.4)$$

де  $t_{\alpha}$  – критерій Стюдента для заданої достовірності (надійності) висновку;  $\sigma$  – стандартне відхилення (середньоквадратична похибка).

Спосіб термічного аналізу рідкого чавуну [95–96] націлений головним чином на підвищення точності результату вимірювання та кількісної оцінки розкиду величини критерію (показника)  $\bar{Z}$ , завдяки введенню в формулу (4.4) статистичної характеристики – двостороннього довірчого інтервалу:  $\pm t_{\alpha}(n) \cdot \sigma/\sqrt{n}$ . А спосіб ТДА, заснований на формулі (4.3), надає можливість враховувати в термічному аналізі кривих охолодження чавуну вагомість впливу температури на кожному відрізку  $i$ , навіть, в кожній точці кривих охолодження на властивості чавуну, чого не передбачає формула (4.4), запропонована в наших патентах [97–98]. При цьому не виключається можливість доповнення формули (4.3) додатком  $t_{\alpha}(n) \cdot \sigma/\sqrt{n}$ .

Методика ТДА, заснована на використанні формули (4.3), не потребує виключення з аналізу будь-якого температурного інтервалу кристалізації чавуну. Зокрема, не потрібно виключати з аналізу період (ділянку ТКО) первинної кристалізації чавуну. Нерівнозначність впливу різних етапів охолодження на його властивості запропоновано визначати величиною коефіцієнту впливу  $K_i$ . Так, температури  $T_i$  в точках  $i$ , що відносяться до інтервалу первинної кристалізації чавуну на кривій ТКО, можна визначити коефіцієнтом  $K_i = 0$ . Це призведе до виключення зазначеного інтервалу охолодження чавуну на вісі часу цієї кривої з розрахунку  $\bar{Z}_u$  за формулою



(4.3). При необхідності величини  $K_i$  можуть бути задані різними для усіх  $i = 1 \dots n$  точок. В одному з варіантів реалізації методики величину коефіцієнту  $K_i$  доцільно визначати в функції латентної (прихованої) теплоти кристалізації чавуну. При подальшому розвитку викладеного способу термічно аналізу рідкого чавуну перспективним виглядає напрям удосконалення способу шляхом введення в аналіз ймовірнісних оцінок міри подібності форми кривих ТКО і РКО з використанням методу Монте-Карло, оскільки кожна з кривих ТКО та РКО має ймовірнісний характер.

#### 4.2. Розробка і вдосконалення основних вузлів та компонентів устаткування для реалізації ТДА.

При виконанні дисертаційної роботи для забезпечення точності і достовірності результатів дослідження форми кривих охолодження рідкого чавуну постала задача, перш за все, удосконалення конструкції пробовідбірника для вимірювання і реєстрації температури зразка рідкого металу, який охолоджується. Сучасні пристрої ТДА складаються з основних вузлів: стаканчика-пробовідбірника і системи накопичення та обробки даних (рис. 4.1).

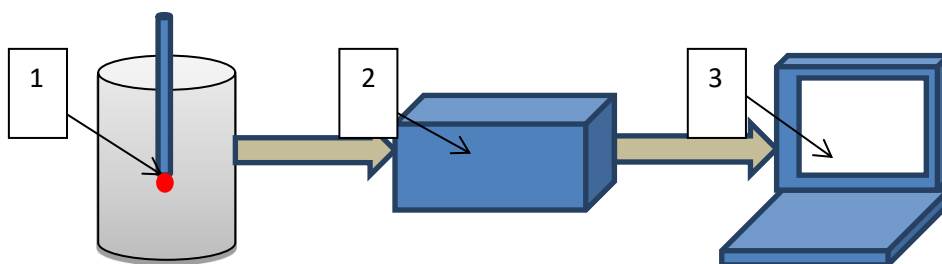


Рис. 4.1. Основні вузли сучасного пристрою для проведення ТДА: 1 – стаканчик-пробовідбірник із вмонтованою термопарою; 2 – АЦП (аналого-цифровий перетворювач); 3 – ПК з програмою збору та обробки даних

*Стаканчики-пробовідбірники для термічного деривативного аналізу.*

Дослідження показали, що матеріал та конструкція пробовідбірника

значно впливають на форму термічної кривої охолодження, яка повинна мати ясні точки вигину; прямолінійну ділянку достатньої довжини; великий нахил в області рідкої фази та сегмента твердої фази [79, 101–113]. Помилка при вимірюванні і реєстрації температури має бути як найменшою. Більшість пробовідбірників відомих закордонних фірм виготовлені з піщано-смоляних сумішей гарячого твердіння та наповнюються рідким чавуном вручну ложкою заливкою зверху. Термопару попередньо розміщують у порожнину пробовідбірника.

Типові конструкції найбільш поширених наливних піщано-смоляних пробовідбірників показані на рис. 4.2. В якості первинного термоперетворювача зазвичай використовують хромель-алюмелеві термопари типу *K* з діаметром дроту 0,3–0,5 мм. Термопари захищають наконечниками із прозорого кварцового скла або керамічною одно- або двоканальною трубкою («соломкою»).

Об'єм пробовідбірника суттєво впливає на визначення методом ТДА величини вуглецевого еквівалента та вмісту *Si* у чавунах [105, 107–108] через вплив об'єму пробовідбірника на мікроструктуру (зменшення об'єму збільшує схильність до відбілу) та швидкість охолодження зразка (першу похідну). Положення гарячого спаю термопари також впливає на точність вимірювання температури через різницю температурних градієнтів у рідкому чавуні. Зі зменшенням об'єму стаканчика темп охолодження чавунного зразка збільшується, що погіршує форму та роздільну здатність термічної кривої і ускладнює вимірювання необхідних показників. Основні недоліки наливних піщаносмоляних пробовідбірників [105, 106], обумовлені їх конструкцією, способом заповнення та особливостями охолодження рідкого чавуну. Втрати температури при використанні ручної заливальної ложки складають не менше 50 °С. Крім того мають місце: нестабільність об'єму заповнення; окиснення струменя чавуну; значне тепловипромінювання відкритої поверхні рідкої проби чавуну; нерівномірність тепловідведення від зразка, який охолоджується.

Відомий сталевий пробовідбірник занурення, призначений для термічного експрес-аналізу чавунів (переважно для ЧВГ), що розроблений шведською компанією «Sinter Cast» (рис. 4.2, в), має вигляд сталевого стаканчика-пробовідбірника, який занурюється у розплав, з подвійними стінками на кшталт мініатюрної судини Дюара [77]. Пробовідбірник призначений для багаторазового використання, але його розробниками не врахований вплив кількості і тривалості циклів занурень на стабільність показань термопари. Це його суттєвий недолік.

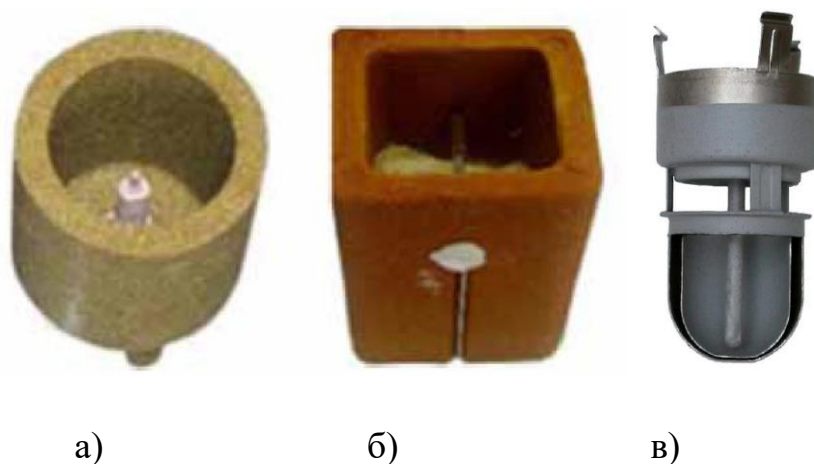


Рис. 4.2. Типові стаканчики-пробовідбірники: а – тип Testip компанії «Leeds and Northrup» [60, 77]; б – тип Quick компанії «Electro-Nite» [60]; в – сталевий стаканчик-пробовідбірник, що занурюється, розроблений шведською компанією «Sinter Cast» [77]

В результаті критичного аналізу недоліків пробовідбірників відомих конструкцій при виконанні даної дисертаційної роботи, була розроблена та експлуатується в лабораторних умовах Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України дослідна установка для реалізації методу ТДА з використанням екологічно безпечного сталевого тонкостінного пробовідбірника занурення з теплоізолюючим покриттям. Розроблений пробовідбірник занурення (рис. 4.3) позбавлений недоліків традиційного наливного піщано-смоляного стаканчика.

Розроблений сталевий тонкостінний пробовідбірник занурення, призначений для відбору проб рідкого металу з тигля печі та виконання ТДА,

покритий вогнетривкою теплоізолюючою фарбою [114] і оснащений вмонтованим первинним перетворювачем типу «К» діаметром 0,3 мм, захищеним кварцовою трубкою діаметром 3 мм і товщиною стінки (0,3...0,4) мм. Дане рішення відповідає вимогам до відбору проб рідкого металу, необхідних для термічного експрес-аналізу хімічного складу чавунів. Він забезпечує однаковий (стабільний) обсяг відібраної з розплаву у печі проби металу, рівномірне тепловідведення від металу відібраної проби в навколишнє середовище, розташування гарячого спаю термопари на осі теплової симетрії у геометричному центрі пробника, стабільність показань первинного перетворювача (рис. 4.3).

Конструкція і розміри сталевго стаканчика-пробовідбірника занурення представлені на креслені у додатку Е дисертації. Матеріал пробовідбірника – низьковуглецева сталь СтЗпс. Маса пробовідбірника 250 г. Маса проби металу у пробовідбірнику 400 г.

В результаті аналізу недоліків традиційних систем і апаратури, призначених для експресного контролю хімічного складу чавунів методом ТДА, була розроблена<sup>3</sup> установка термічного експрес-аналізу хімічного складу рідких чавунів. Установка (рис. 4.4 та рис. 4.5) складається з пробовідбірника з вмонтованим термоелектричним змінним перетворювачем та встановленою металевою пробницею, аналого-цифрового перетворювача АЦП, інтерфейсу RS 485, комп'ютерної програми збору та обробки даних ThermoEX [59].

---

<sup>3</sup> У співавторстві з Е.В. Захарченко, О.Л. Гончаровим, О.В. Богданом. Участь авторки даної дисертації полягала в аналізі сучасних засобів для проведення ТДА. створенні захисного покриття пробовідбірника, тестуванні установки.



Рис. 4.3. Загальний вигляд сталевого тонкостінного пробовідбірника занурення з вогнетривким теплоізолюючим покриттям та одноразовим термопарним пакетом: а) – стаканчик-пробовідбірник; б) – одноразовий термопарний пакет [58]

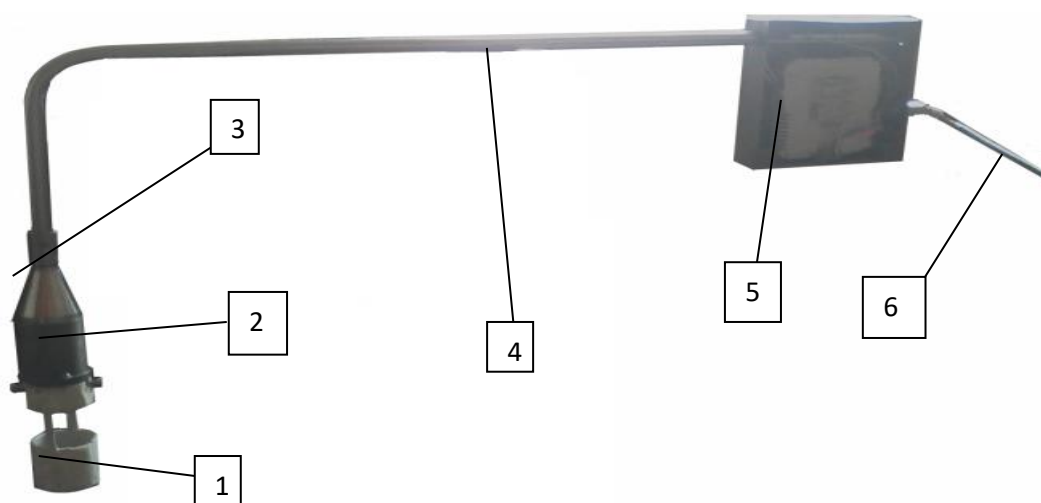


Рис. 4.4. Колінчастий зонд з АЦП та теплоізольованим занурювальним сталевим пробовідбірником з термопарою та термороз'ємом: 1 – сталевий стаканчик-пробовідбірник занурення; 2 – кріпильні болти; 3 – корпус із термороз'ємом; 4 – подовжуюча трубка; 5 – захисний корпус для АЦП; 6 – подовжуючий екранований кабель USB, застосований при відборі проб рідкого металу з лабораторної печі (2,5 кг), індукційної середньочастотної печі (160 кг) та транспортно-заливального ківша у промислових умовах (60 кг) [59]

Компоненти діючої лабораторної установки вдосконаленого деривативного термічного експрес-аналізу якості рідких чавунів показані у додатку Є. Схема розробленої системи ТДА показана на рис. 4.5.

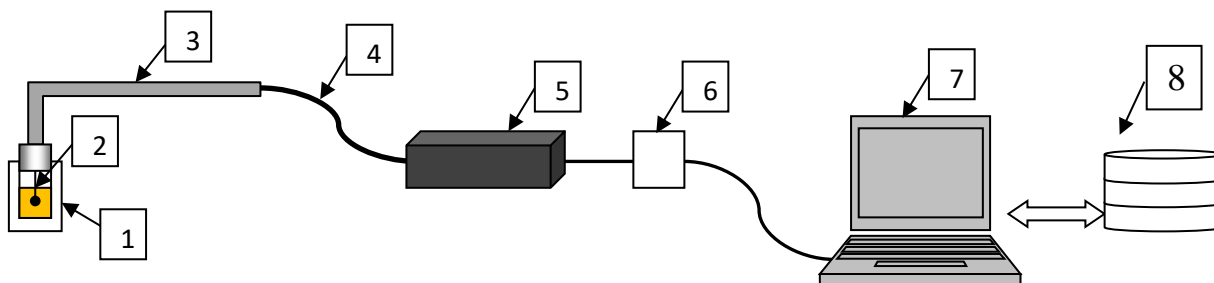


Рис. 4.5. Структурна схема запропонованої установки ТДА: 1 – циліндрична сталева занурювальна пробниця з вогнетривким покриттям; 2 – пакет із первинним термоелектричним вимірювальним перетворювачем хромель-алюмель; 3 – термороз'єм з трубчастим пробовідбірником; 4 – з'єднувальний екранований кабель передачі сигналу до вторинного вимірювального перетворювача; 5 – вторинний вимірювальний перетворювач WAD-AIK-BUS; 6 – модуль перетворення інтерфейсу RS485/USB; 7 – персональний комп'ютер із програмним забезпеченням ThermoEX; 8 – база даних з РКО

Відповідно вимогам до метрологічних та частотних характеристик вторинних вимірювальних перетворювачів для експериментальної установки було обрано чотириканальний модуль аналого-цифрового перетворення WAD-AIK-BUS фірми АКОН (Київ). Цей модуль забезпечує надійну реєстрацію та запис кривих охолодження металевих сплавів. Технічні характеристики модуля WAD-AIK-BUS представлені у додатку Ж.

Розроблене у ФТІМС за участю автора даної дисертації програмне забезпечення системи деривативного термічного аналізу [96] включає керуючу програму ThermoEX, а також електронну базу даних референсних кривих, щодо складу і властивостей сплавів («thermoex.mdb»), реалізовану в СУБД MS Access. Загальний інтерфейс програми показаний на рис. 4.6.

Програма реалізує всі необхідні алгоритми вимірювання, фільтрації, перетворення, запису, зберігання та аналізу кривих охолодження сплавів за розробленими методиками. Програма має інтуїтивно зрозумілий інтерфейс та реалізує більшість алгоритмів у автоматичному режимі.

Таким чином, в рамках виконання даної дисертації роботи було вдосконалено на рівні винаходів [97–98] спосіб ТДА шляхом порівняння досліджуваної та референсної кривих за допомогою критеріїв  $\bar{Z}$  і  $\bar{Z}_u$ , а також модернізації, по суті створення нової системи апаратурної реалізації термічного деривативного аналізу чавуну. На рис. 4.7 представлено блок-схему алгоритму, заснованого на теоретичній базі способів [97, 98]

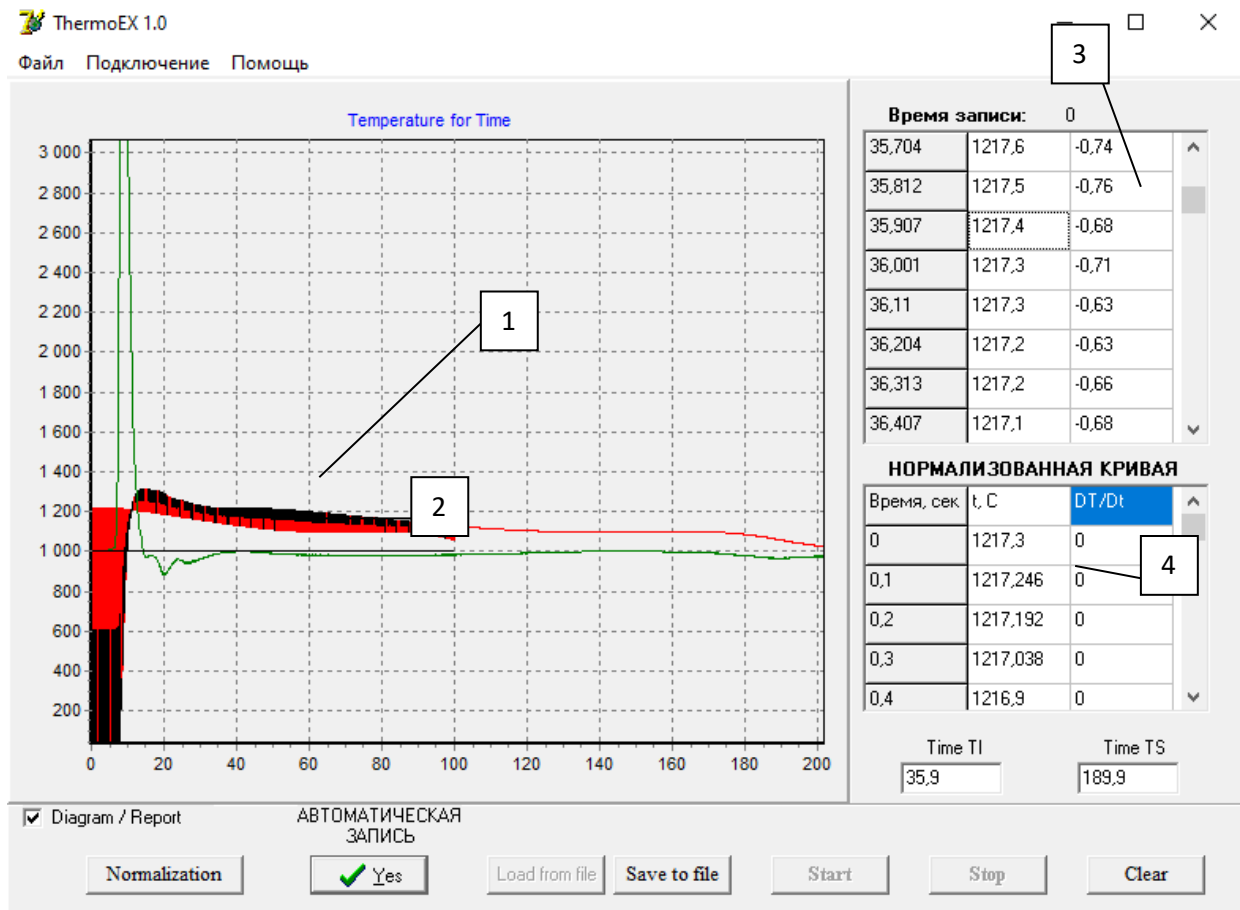


Рис. 4.6. Робоче вікно керуючої програми ThermoEX 1.0: 1 – термічна крива охолодження чавунного зразка  $T = f(\tau)$ ; 2 – перша похідна  $dT/d\tau$ ; 3 – таблиця значень часу, температури та похідної; 4 – таблиця значень перетвореної кривої охолодження з шкалою умовного часу

Розроблений алгоритм реалізації методу ТДА (рис. 4.7) є універсальним та придатний для експрес-аналізу кількісних показників якості різноманітних рідких ливарних сплавів (чавунів, кольорових та спеціальних сплавів, сталей). Зокрема, удосконалений метод ТДА дозволяє визначити за допомогою референсних кривих, накопичених в електронній базі даних, вміст не тільки нормованих основних хімічних елементів, а й весь комплекс будь-яких домішок, що містяться в розплаві.



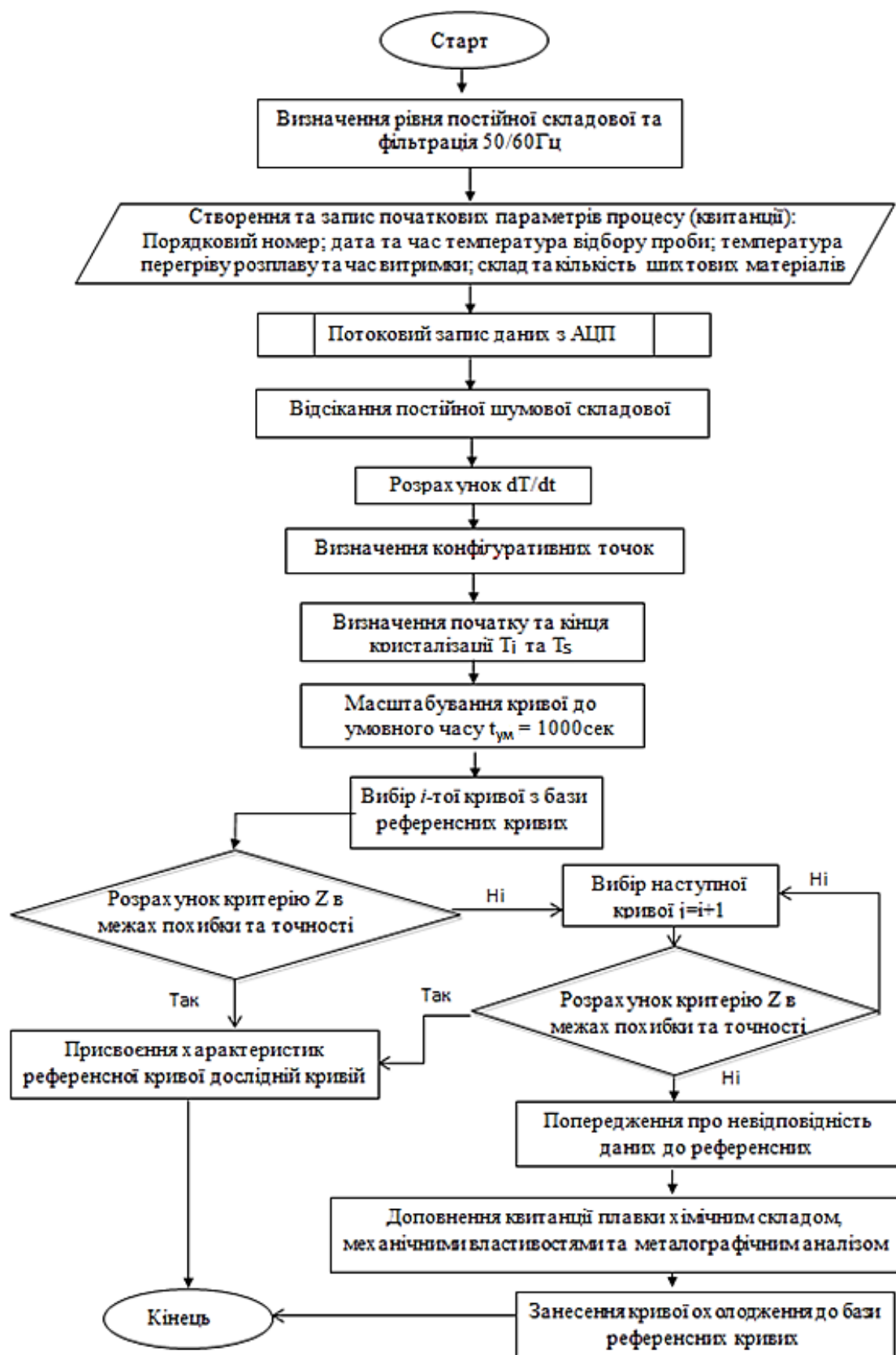


Рис. 4.7. Блок-схема послідовних етапів алгоритму обробки термічних кривих [59]

#### **4.3. Верифікація способу ТДА для прогнозування якості готового виливка заданого хімічного складу до заливки ливарних форм.**

При виконанні даної дисертаційної роботи досліджено та порівняно три групи доєвтектичних чавунів: зразки чавунів 1 та 2 з перлітно-ледебуритною основою; зразки чавунів 3 та 4 з перлітно-феритною основою; зразки чавунів 5 та 6 з перлітно-ледебуритною основою [78].

Металографічні зразки вказаних чавунів шліфували та полірували на спеціальному автоматичному обладнанні використовуючи плече Struers' Rotofor, а також спеціальні матеріали для шліфування та полірування. Зразки спочатку полірували на дисках із зернистістю 80, 120 та 220 протягом 5 хв. Після цього зразки шліфували на дисках з розмірами зерен 600, 2000 та 4000 протягом 5 хв. Під час шліфування зразки та інструменти охолоджували водою.

Далі шліфи полірували на диску MD Piano з полірувальною тканиною, використовуючи алмазну суспензію із зернистістю частинок 3 мкм з добавкою мастил DP-Lubricant та Blue-Lubricant до досягнення задовільного візуального ефекту.

Кількісний та якісний аналіз мікроструктури зразків сірого та білого чавунів виконано на факультеті ливарного інжинірингу «Гірничо-металургійної Академії» (м. Краків, Польща).<sup>4</sup> Фото мікроструктур отримано за допомогою світлового металографічного мікроскопа LeicaMEF4M з фотокамерою LeicaDFC290. Для кількісного аналізу мікроструктури використано програму LeicaQWin. Справжнє збільшення на мікрофотографіях вказано за допомогою спеціальних маркерів. Аналізи були виконані як на нетравлених зразках для оцінки форми та розташування включень графіту, так і після травлення реактивами Nital та Sted. У ході аналізів було підготовлено класифікацію типів евтектичного графіту та виконано серії вимірювань його лінійних параметрів. Визначено кількість

---

<sup>4</sup> Висловлюю окрему подяку професору, доктору технічних наук Бурбелку Андрію Олександровичу за допомогу у виконанні цих дослідів.

евтектичних зерен та їх розмір після травлення реактивом Sted, оцінено мікроструктуру металевої матриці, зафіксовано відбіл чавуну, оцінено складові мікроструктури основи. Результати аналізів мікроструктури зразків представлені як атлас мікроструктур (рис. 4.12–4.13). Результати кількісного металографічного аналізу представлені у табличній формі (табл. 4.1–4.2).

В ході лабораторних плавок отримані зразки 1 та 2 чавуну хімічного складу (мас.,%): 3,28C; 2,1Si; 0,8Mn загальною масою 2,1 кг. Температура заливки першого зразка 1400 °С. Після витримки розплаву 10 хв за температури у 1350 °С був отриманий зразок 2 за температури заливки у 1400 °С. Криві охолодження та їх перші похідні показані на рис. 4.10.

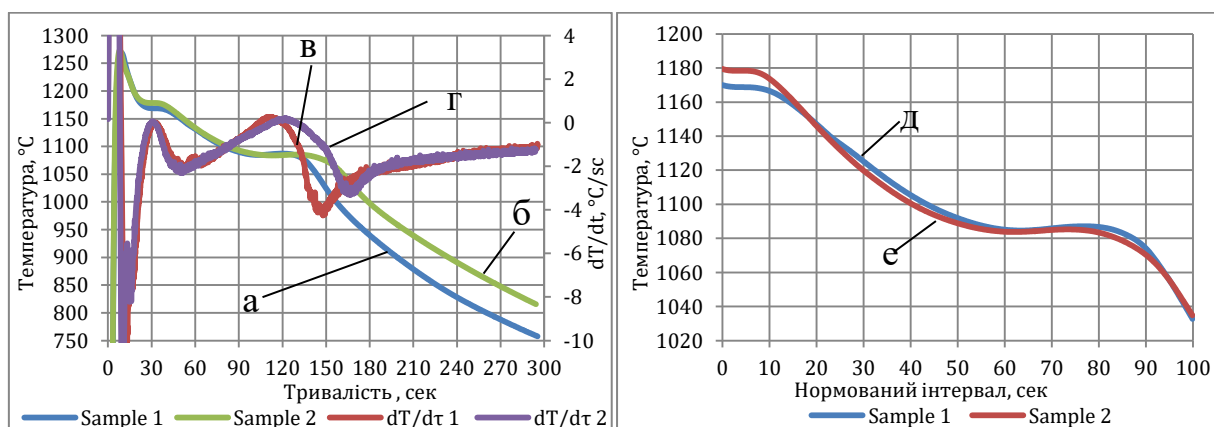


Рис. 4.8. Криві охолодження зразків чавуну та їх перші похідні: крива охолодження та перша похідна зразка 1 – а та б; крива охолодження та перша похідна зразка 2 – в та г; нормовані криві охолодження зразків: 1 – д та 2 – е [19]. Нормований інтервал (масштабування) – це інтервал затвердіння чавуну із  $T_L$  по  $T_S$ , розділений на 100 рівних частин, таким чином приведений до однакового часового інтервалу

Для зразків 3 і 4 використали чавун того ж хімічного складу, що і для зразків 1 і 2, масою 1,7 кг з добавкою низьковуглецевої сталі складу (мас., %) 0,18C, 0,8Si, 0,5Mn, 0,25Cr кількості 0,100 кг та FeSi45 у кількості 0,020 кг. Температура заливки зразка 3 була 1400 °С. Після витримки розплаву протягом 12 хв за температури 1330 °С був взятий зразок 4 за температури

залівки 1410 °С. Відповідні криві охолодження та їх перші похідні показані на рис 4.9.

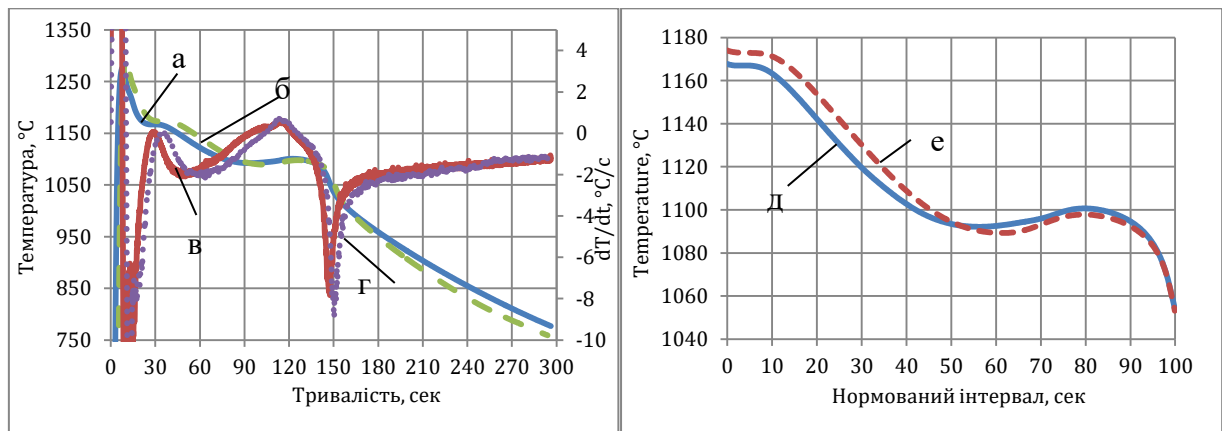
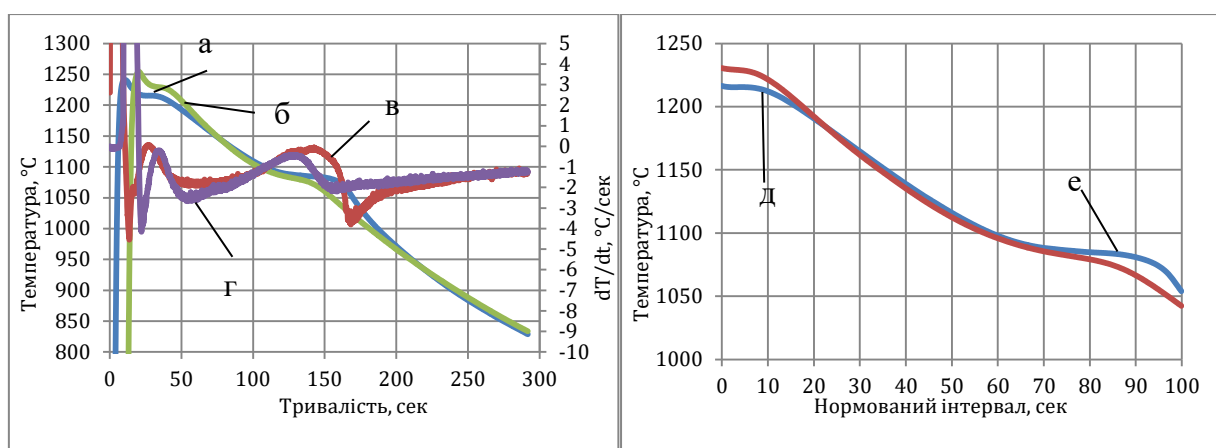


Рис. 4.9. Криві охолодження зразків чавуну та їх перші похідні: крива охолодження та перша похідна зразка 3 – а та б; крива охолодження та перша похідна зразка 4 – в та г; нормовані криві охолодження зразків: 1 – д та 2 – е [58]

Для зразків 5 і 6 використаний чавун того ж хімічного складу, що і для зразків 1 і 2 в кількості 1,680 кг з добавкою 0,200 кг сталевих брухту складу (мас., %) 0,18C, 0,8Si, 0,5Mn, 0,25Cr. Зразок 5 був узятий за температури у 1400 °С; потім розплав був нагрітий до температури 1410 °С, витриманий у печі 10 хв за температури у 1330 °С. Після чого зразок 6 було взято за температури розплаву у 1400 °С. Відповідні криві охолодження та їх перші похідні показані на рис. 4.10.

Після масштабування кривих охолодження був розрахований критерій збіжності  $\bar{Z}$  за формулою (4.2) для всіх пар зразків. Результати представлені на рис. 4.11.



а

б

Рис. 4.10. Криві охолодження зразків чавуну та їх перші похідні: крива охолодження та перша похідна зразка 5 – а та б; крива охолодження та перша похідна зразка 6 – в та г; нормовані криві охолодження зразків: 5 – д та 6 – е [58]

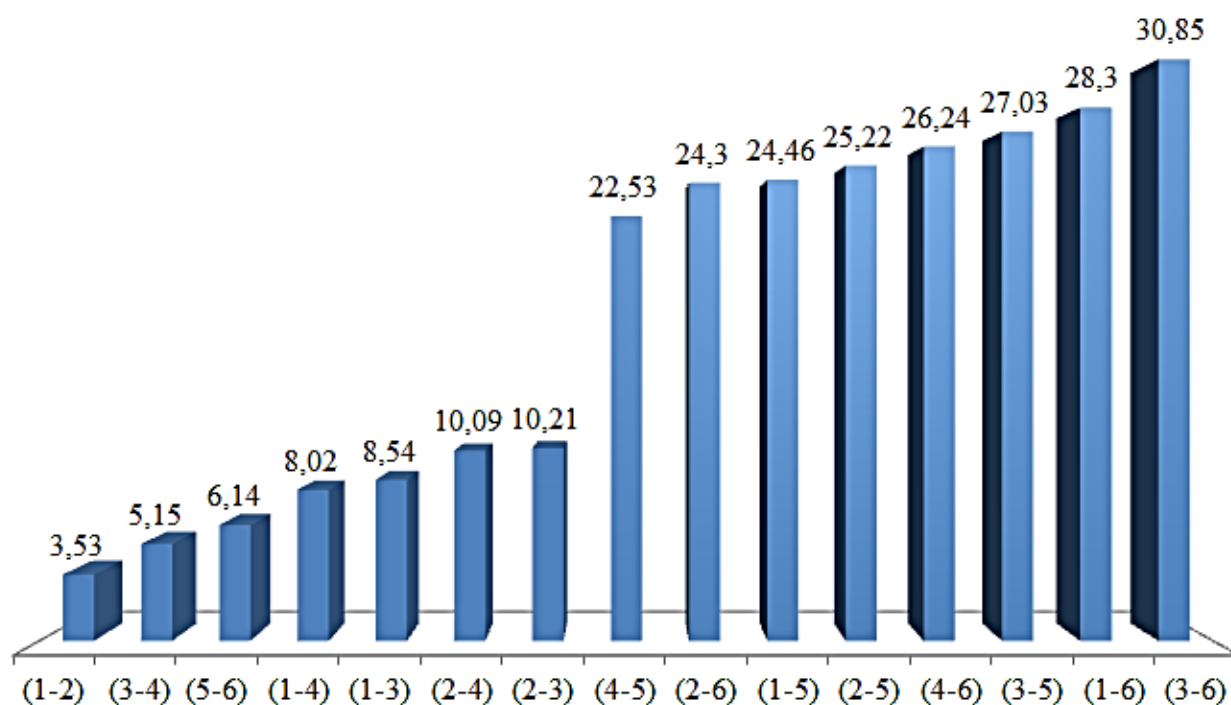


Рис. 4.11. Результати розрахунку критерію  $\bar{Z}$  для усіх пар зразків

На рис 4.12–4.13 показані мікроструктури зразків 1 та 2, 3 та 4, 5 та 6, травлених реактивами Nital та Sted.

У таблиці 4.1 наведено об'ємні частки складових мікроструктури у зразках 1–6. У таблиці 4.2 наведено дані про довжину найбільш довгих включень графіту у зразках 3 і 4. У перлітно-ледебуритних зразках 1 і 2 виявлені окремі острівці графітно-аустенітної евтектики.

Таблиця 4.1

Об'ємні частки складових мікроструктури чавуну у зразках

Зразок №	Складові мікроструктури, %			
	Ледебурит	Графіт	Перліт	Ферит
1	25	13	62	0
2	28	19	53	0
3	0	29	58	13
4	0	36	56	8
5	23	3	74	0
6	18	5	77	0

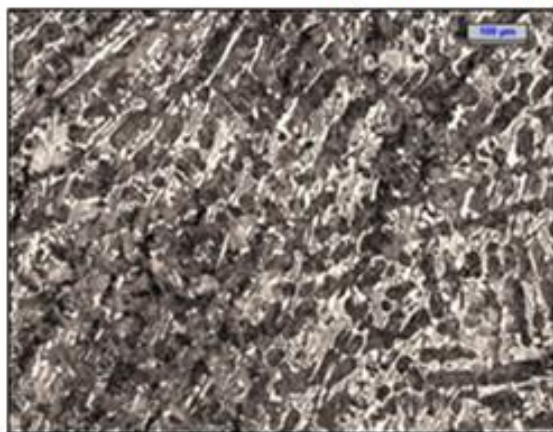
Таблиця 4.2

Довжина найбільш довгих включень графіту у зразках 3 та 4

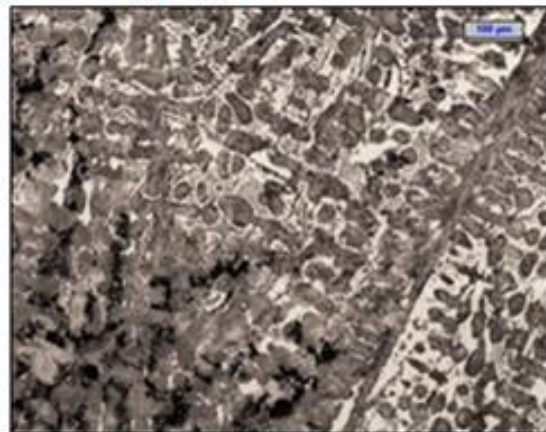
Зразок №	Довжина графітних включень, мкм					
	1	2	3	4	5	Середня
3	99,5	72,0	118,5	103,3	109,1	100,5
4	53,3	96,0	98,3	72,8	90,1	82,1



### Перлітно-ледебуритна структура

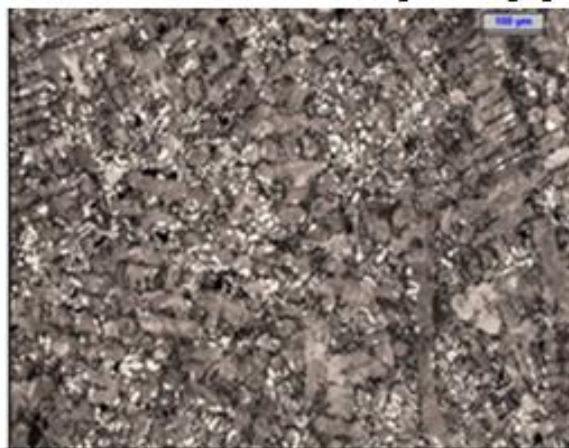


а

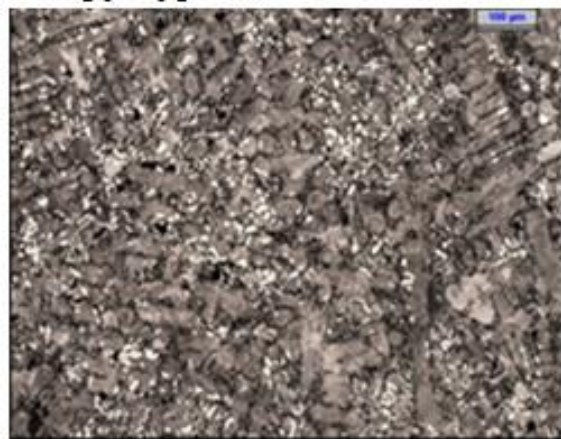


б

### Перліто-феритна структура

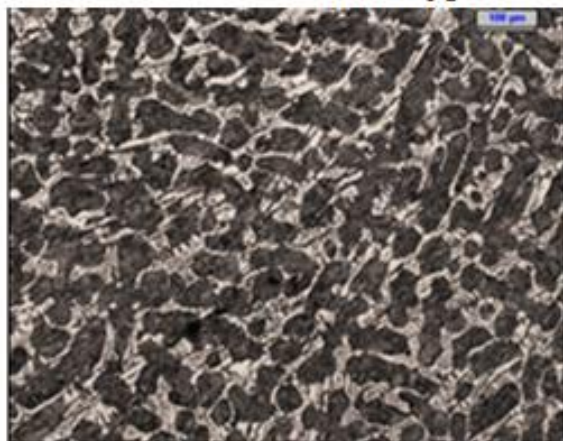


в

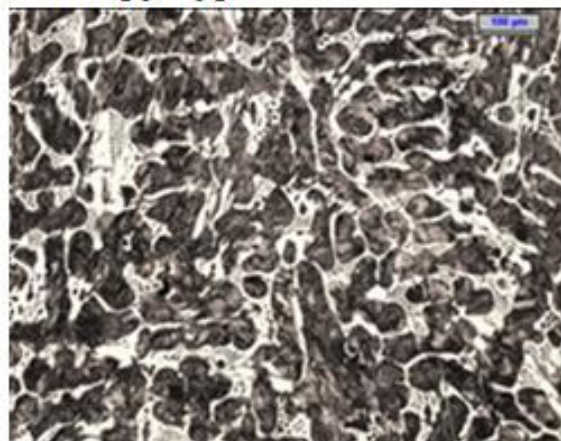


г

### Ледобурито-перлітна структура



д



е

Рис. 4.12. Мікроструктури зразків чавуну, травлених Ніталем. Збільшення  $\times 100$ : а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6 [58, 78]



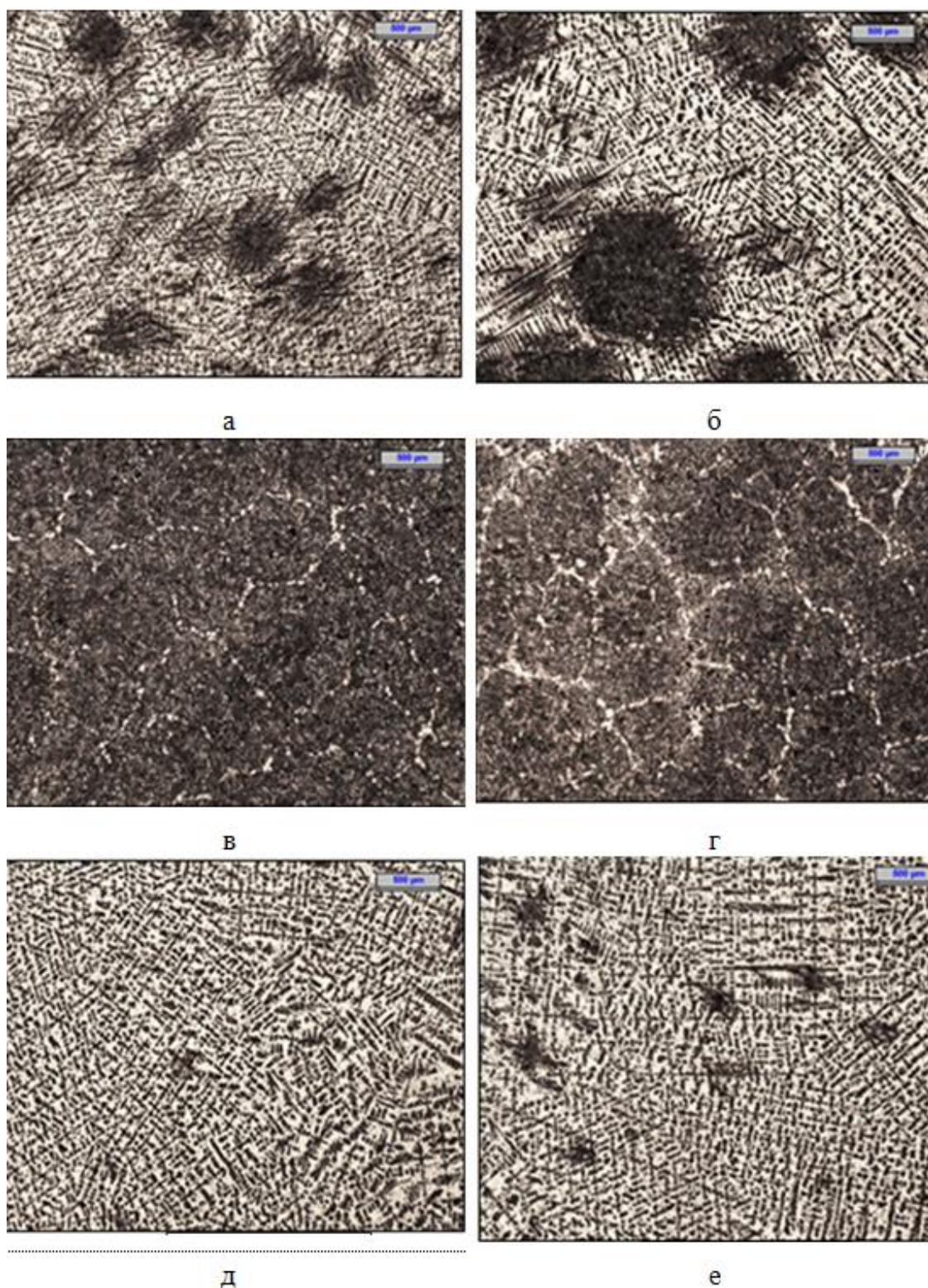


Рис. 4.13. Мікроструктури зразків чавуну, травлені реактивом Стєда. Збільшення  $\times 100$ : а – 1; б – 2; в – 3; г – 4; д – 5; е – 6 [58, 78]

Наявність ледебуриту рис. 4.12 (а, б, д, е) в нелегованому чавуні та дендритна форма мікроструктурних складових показали, що чавун має доєвтектичний склад, далекий від евтектичної точки. У випадку отримання



подібного чавунного зразка, можна засвідчити, що ефективне модифікування дозволить повністю виключити відбіл. Застосувати можна, наприклад FeSi45, кількість якого можна вирахувати при допомозі програми «alloyage», що описана у п. 4.4 даної дисертаційної роботи.

У зразках 3 і 4 присутній міждендритний графіт типів Д і Е. Більш ефективне модифікування дозволить запобігти утворенню графіту типу Д і замінити його на графіт типу А. Розмір евтектичних зерен також підтверджує необхідність більш сильного модифікування, розрахунок кількості якого, також можливий із застосуванням програми «Alloyage», що описана у п.3.4. цієї дисертаційної роботи.

Згідно з результатами виконаних досліджень та аналізу наведених мікроструктур (рис. 4.12, 4.13) зразки 1 – 2, 3 – 4 та 5 – 6 попарно подібні один до одного (рис. 5.8–5.10)  $\bar{Z}_{1-2} = 3,53$  °C;  $\bar{Z}_{3-4} = 5,15$  °C;  $\bar{Z}_{5-6} = 6,14$  °C. При цьому зразки 1–3 та 1–4 мають величину критерію  $Z_{1-3} = 8,54$  °C;  $\bar{Z}_{1-4} = 8,02$  °C, але зважаючи на те, що ці пари зразків мають суттєві розбіжності у складових мікроструктур, можна сказати, що межа критерію  $\bar{Z}$  має бути на рівні 6 °C.

Таким чином, властивості сплаву референсного зразка, якому відповідає крива охолодження (РКО), будуть присвоєні дослідному зразку чавуну, при порівнянні за допомогою критерію  $Z$  відповідної йому кривої (ТКО) при  $\bar{Z} \leq 6$  °C.

Результати проведених досліджень з використанням методу ТДА та референсних кривих охолодження засвідчили, що зразки чавуну, які були відібрані з однієї й тієї ж ванни металу, мали подібний хімічний склад, але відмінну металографічну структуру, а відповідно і властивості внаслідок різних умов виплавки. Критерій розпізнавання у методі ТДА при цьому реагує на найменші зміни мікроструктури та хімічного складу зразків. Це важливий науково-технічний результат і висновок.

#### Висновки до розділу 4.

Вдосконалено метод термічного деривативного експрес-аналізу рідких чавунів, який ґрунтується на розпізнаванні геометричної схожості кривих, що досліджується, і референсних кривих охолодження з електронної бази даних.

Розроблено алгоритми та програми математичної обробки результатів дослідження термічних кривих охолодження залізовуглецевих сплавів. Визначено, що алгоритм методу є універсальним та придатним для експрес-аналізу кількісних показників якості рідких ливарних сплавів. Зокрема, метод дозволяє визначити за допомогою референсних кривих, що накопичені у електронній базі даних заздалегідь, не тільки хімічний склад основних елементів, але і весь комплекс будь-яких домішок, що містяться у розплаві, а також отримувати інформацію про мікроструктуру та механічні властивості дослідного зразка металу.

Уточнено базову формулу розрахунку універсального критерію розпізнавання форми кривих охолодження. Розроблено нову універсальну формулу розрахунку критерію подібності (розпізнавання) форми термічних кривих охолодження рідких чавунів.

Отримано нові наукові результати. А саме:

- підвищено точність результату вимірювання та кількісної оцінки розкиду величини критерію (показника)  $\bar{Z}$  завдяки введенню в формулу (4.4) статистичної характеристики – двостороннього довірчого інтервалу:

$$\pm t_{\alpha}(n) \cdot \sigma / \sqrt{n};$$

- запропоновано враховувати в термічному аналізі кривих охолодження чавуну вагомість впливу температури на його властивості на кожному відрізку і навіть в кожній точці кривих охолодження. Показано, що введення коефіцієнта впливу  $K_i$  дозволяє оцінювати вагомість будь-якого температурного інтервалу кристалізації чавуну на його властивості. Зокрема дозволяє, якщо потрібно, виключати з аналізу період (ділянку ТКО) первинної кристалізації чавуну. Запропоновано температури  $T_i$  в точках  $i$ , що

відносяться до інтервалу первинної кристалізації чавуну на кривій ТКО, визначати коефіцієнтом  $K_i = 0$ . Це рішення виключає зазначений інтервал охолодження чавуну на вісі часу цієї кривої з розрахунку  $\bar{Z}_u$ . За необхідності величини  $K_i$  можуть бути задані різними для усіх  $i = 1 \dots n$  точок.

На рівні винаходів удосконалено конструкції засобів експресного контролю хімічного складу сплавів. Здійснено верифікацію розроблених засобів та методів експресного контролю хімічного складу сірого чавуну. Розроблена та експлуатується на середньочастотній печі 160 кг та лабораторній печі 2 кг Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України дослідно-промислова установка вдосконаленого ТДА із використанням екологічно безпечного сталевого тонкостінного пробовідбірника занурення зі спеціально розробленим теплоізолюючим покриттям. Рекомендовано використання установки на ливарному заводі ТОВ «М-ЛІТ» при виплавленні чавуну в індукційній 3-тонній печі.

На завершення вважаю за необхідне зазначити, що у процесі роботи над дисертацією, використовувались класичні підручники, фундаментальні монографії, довідники, публікації вітчизняних та закордонних вчених, зокрема [2, 11, 46–48, 56–63, 67, 70–71, 73, 91, 114–172 та ін.].

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Розвинуто комплекс поглядів, уявлень, ідей, спрямованих на розвиток теорії і технології виплавлення синтетичного сірого чавуну в індукційних тигельних печах шляхом удосконалення системи контролю і регулювання його хімічного складу, структури і властивостей.

Встановлено закономірності і параметри розподілу вмісту хімічних елементів та вуглецевого еквівалента в складі чавуну промислових партій на прикладах гальмівних колодок типу «М» і «клину Ханіна» для залізничного транспорту. Показано, що хімічні елементи у складі чавуну, його вуглецевий еквівалент не корелюють між собою та з величинами твердості й міцності на злам колодок при відносно вузькому діапазоні вуглецевого еквівалента чавуну промислових партій цих ливарних виробів.

На основі критичного аналізу відомих рішень розроблено методологію моделювання та алгоритми визначення маси компонентів шихти для виплавлення сірого чавуну і коригування хімічного складу його розплаву під час плавки в індукційних тигельних печах. Новизна розробок полягає у врахуванні в ймовірнісному аспекті із застосуванням методу Монте-Карло нестабільності вмісту хімічних елементів у модифікаторах (феросплавах тощо), які використовують для корекції складу чавуну.

В результаті досліджень, запропоновано і реалізовано з використанням комп'ютерного моделювання із застосуванням методу Монте-Карло методику, яка враховує ймовірнісний характер вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію в хімічному складі сірого синтетичного чавуну та властивостей виливків з нього, що виплавляють в промислових умовах ливарних підприємств.

Запропоновано критерій оптимальності процесу коригування хімічного складу чавуну при його виплавленні, який враховує ступінь вагомості вмісту кожного хімічного елемента у чавуні та попередньо визначені допустимі похибки результатів розрахунків.

З позицій ймовірного підходу встановлено наявність кореляційних зв'язків і коефіцієнти кореляції між вуглецевим еквівалентом, ступенем евтектичності, відношенням вмісту вуглецю до вмісту кремнію у хімічному складі сірого чавуну з пластинчастим графітом і механічними властивостями виливків, виготовлених відповідно до вимог ДСТУ 8833:2019.

За результатами аналізу теоретичних і експериментальних досліджень розроблено емпіричні формули, що відображають у ймовірному підході залежності міцності, твердості, теплопровідності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом від ймовірних величин показників  $C_{\text{екв}}$ ,  $S_{\text{евт}}$ ,  $C/Si$  його хімічного складу. Показано перспективність використання на практиці запропонованого підходу і розроблених формул для прогнозу твердості, міцності, коефіцієнта теплопровідності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом за даними його хімічного складу.

На прикладі аналізу масивів показників якості промислових партій-плавок чавунних гальмових колодок та «клин» Ханіна для залізничного транспорту (~ 200 партій-плавок), виготовлених згідно з вимогами ГОСТ 30249-97 і ГОСТ 34503-2018, встановлено параметри розподілу вмісту C, S, Mn, P, S та вуглецевого еквівалента у чавуні цих ливарних виробів. Сформовано відповідну базу даних. Показано, що у відносно вузьких діапазонах змін вуглецевого еквівалента чавуну ( $C_{\text{екв}} = 3,3 \dots 3,6$  % для ГОСТ 30249-97) та ( $C_{\text{екв}} = 3,08 \dots 3,5$  % для ГОСТ 34503-2018) залежності твердості й міцності виливків від величини вуглецевого еквівалента не простежуються внаслідок значного розкиду значень механічних властивостей виливків порівняно з величинами діапазонів  $C_{\text{екв}}$ .

На підставі результатів виконаних досліджень обґрунтовано доцільність внесення доповнень і уточнень вимог до хімічного складу сірого синтетичного чавуну, регламентованих у стандартах і технічних умовах на ливарну продукцію. Зокрема рекомендовано зменшити вміст сірки у хімічному складі сірого синтетичного чавуну до рівня не більше 0,05 %.

Розроблено ідеологію та алгоритм визначення маси компонентів шихти для виплавлення синтетичного чавуну і коригування хімічного складу його розплаву під час плавки в індукційних печах. Новизна розробок полягає у врахуванні в імовірнісному аспекті із застосуванням методу Монте-Карло для врахування нестабільності вмісту хімічних елементів у легуючих матеріалах (феросплавах тощо), які використовують для корекції складу чавуну.

Введено поняття «домінуючий хімічний елемент», «коефіцієнти вагомості», які характеризують відносну ступінь важливості кожного з хімічних елементів при регулюванні їх вмісту у складі чавуну в процесі його виплавлення та поняття «точок прицілювання» при корекції хімічного складу розплаву в процесі плавки для забезпечення вмісту заданих елементів поблизу верхньої або нижньої границь їх діапазонів, регламентованих стандартами на зазначені ливарні вироби.

За результатом виконаних досліджень фактичної якості ливарної продукції та аналізу відповідних стандартів розроблено пропозиції щодо удосконалення вимог до хімічного складу чавуну і властивостей гальмівних колодок залізничного транспорту. Зокрема, рекомендовано зменшити в стандартах вміст сірки в сірому чавуні, який виплавляють в індукційних печах, до 0,05 % та зменшити діапазони розподілу інших хімічних елементів.

Економічна ефективність, обумовлена зменшенням сумарних витрат на виготовлення і експлуатацію чавунних колодок, враховуючи їх всепогодність та низьку ймовірність пошкодження колодками поверхні кочення коліс транспортних засобів.

Розвинуто методику термічного деривативного аналізу (ТДА) рідкого чавуну у процесі литва шляхом удосконалення способу визначення форми термічних кривих охолодження (ТКО) розплаву і порівняння їх з референсними кривими охолодження (РКО). Новизна розроблених способів термічного аналізу рідкого чавуну захищена патентами України на винахід (№ 113333) і корисну модель № 99968 та свідоцтвом № 17697 на авторське

право. Розроблено і доведено до застосування на практиці пробовідбірники занурення нової конструкції, які забезпечують стабільність умов відбору проб рідкого металу.

Розроблено новий спосіб термічного аналізу рідкого чавуну, який враховує нерівнозначність впливу різних температурних діапазонів охолодження рідкого чавуну на його властивості шляхом введення в розрахункову формулу відповідного коефіцієнта впливу.

Розроблено, апробовано та прийнято до використання в режимі радника персоналу на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ» програмне забезпечення щодо розрахунку складу шихти для виплавлення в індукційних тигельних печах сірого чавуну та коригування в ньому вмісту хімічних елементів під час плавки. Розроблено типову технологічну інструкцію (Методологічні рекомендації) щодо застосування системи контролю і регулювання хімічного складу чавуну в процесі виплавлення в індукційних тигельних печах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Сіренко К.А. Ливарне виробництво: невирішені задачі та перспективи розвитку // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві». Краматорськ. ДДМА, 21–24 вересня 2021. С. 109–111.
2. Шумихин В.С., Лузан П.П., Жельніс М.В. Синтетический чугу́н. К.: Наукова думка, 1971. 159 с.
3. Кимстач Г.М. Синтетический чугу́н // Заготовительное производство в машиностроении, 2007. № 2. С. 7–14.
4. Попов Е.С., Мазур В.Л., Шинський О.Й. Удосконалення ливарного виробництва в Україні // Литво. Металургія, 2021. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво-2021». Запоріжжя, 2021. С. 160–164.
5. Неижко И.Г., Найдек В.Л., Гаврилюк В.П. Тормозные колодки железнодорожного транспорта. К., 2009. 121 с.
6. Попов Е.С., Шинский О.И. Анализ показателей качества колодок тормозных чугунных и композиционных для железнодорожного подвижного состава // Литье и металлургия. 2021. № 1. С. 27–37.
7. Мазур В.Л., Найдек В.Л., Попов Є.С. Порівняння чавунних і композиційних з чавунними вставками гальмових колодок для рухомого складу залізниці // Метал та лиття України (Met. lit'e Ukr.). Vol. 29. 2021. № 2 (325). С. 30–39.
8. Ямшинський М.М., Назаренко В.С., Кравченко К.О. Аналіз гальмівних колодок та шляхи оцінки їх перспективних конструкцій // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. 2015. № 1 (218). С. 204–209.
9. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва // Метал та лиття України, 2021. Т. 29. № 4 (327). С. 44–54.



10. Семесенко М.П., Пелых С.Г. ЭВМ в управлении литейными процессами. – Донецк: Донбасс, 1975. – 96 с.
11. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Прогнозування механічних властивостей сірого чавуну (ймовірнісний підхід) // Металознавство та обробка металів, 2023. № 3. Т. 29. С. 19–30.
12. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Оцінка підходів до прогнозування властивостей синтетичного чавуну у ливарному виробництві // Металознавство та обробка металів, 2023. № . Т. 28. С. 24–35.
13. Пелых С.Г., Семесенко М.П. Оптимизация литейных процессов. – Киев. Вища школа, 1977. – 192 с.
14. Сіренко К.А. Напрями розвитку методології регулювання хімічного складу і властивостей чавуну в ливарному виробництві на базі ймовірнісного підходу // Металознавства та обробка металів. 2023. Т. 29 (108). № 4. С. 23–33.
15. Сіренко К.А. Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах // Процеси лиття, 2022. № 1 (147). С. 3–10.
16. Сіренко К.А. Розвиток методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах // Метал та лиття України (Met. lit'e Ukr.), 2022. Т. 30. № 2 (329). С. 20–29.
17. Ямшинський М.М. Жаростійкі та зносостійкі ливарні сплави на основі заліза для роботи в екстремальних умовах // Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Київ. ФТІМС НАН України, 2019. 510 с.
18. Мазур В.Л., Сіренко К.А. Аналіз тенденцій розвитку виробництва литва з синтетичного чавуну (на прикладі порівняння гальмівних колодок для рухомого складу залізниці, виготовлених з різних матеріалів). У зб. «Теория и практика металлургии». 2023. № 3. С. 5–14.  
[https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_03\\_2022\\_site.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_03_2022_site.pdf)

19. Сіренко К.А., Дереча Д.О., Мазур В.Л. Застосування методу Монте-Карло в розрахунках шихти й регулюванні хімічного складу чавуну в процесі його виплавлення Застосування методу Монте-Карло в розрахунках шихти й регулюванні хімічного складу чавуну в процесі його виплавлення // Процеси лиття. 2023. № 4 (154). С. 44–57. <https://doi.org/10.15407/plit2023.04.044>
20. Пономаренко О.И. Оптимизация технологических решений в условиях реконструкции литейных цехов // Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Харків. ХГПУ. 1998. 508 с.
21. Пелых С.Г. Управление качеством отливок из железоуглеродистых сплавов на основе кибернетических моделей // Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Луганск. Восточноукраинский национальный университет имени Владимира Даля. 2004. 375 с.
22. Селівьорстов В.Ю. Програмний засіб розрахунку шихти з урахуванням економічного показника ефективності // Наукові праці. Комп'ютерні технології. 2011. Вип. 161. Т. 173. С. 154–157.
23. Курдюмов Д.Я., Тэн Э.Б., Расчет оптимального состава шихты на ЭВМ. М.: Металлургия. 1984. 73 с.
24. Ямшинський М.М., Грядовський І.О. Програмне забезпечення для розрахунку шихти для сталей // V Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». Київ. 28–29 травня 2013. С. 144–146.
25. Воздвиженский В.М., Грачев В.А., Спасский В.В. Литейные сплавы и технология их плавки в машиностроении. М.: Машиностроение, 1984. 432 с.
26. Архангельский А.В., Писаренко Л.З., Аверкин С.И. Компьютерная программа расчета состава шихты. Литейное производство. 2000. № 12. С. 26–27.
27. Друян И.А. Расчет шихты методом последовательного корректирования. Литейное производство. 1971. № 2. С. 42–43.

28. Шитиков В.С. Применение ЭВМ для расчета оптимального состава шихты / В.С. Шитиков, Л.К. Чеботарь, Ю.В. Мастиновский, В.Л. Ларичкин // Литейное производство. 1980. № 9. С. 11–12.
29. Андрианов Н.В. Определение оптимального состава металлошихты для различного марочного сортамента сталей, выплавляемых в ДСП-100 № 3 РУП «Белорусский металлургический завод» / Н.В. Андрианов, А.Г. Афанасиади, И.Л. Нумеранова, А.В. Демин, Н.Л. Мандель, Д.К. Грибок, О.Н. Тыщенко. Литье и металлургия. 2004 (3). С.107–109.
30. Рафальский И.В., Довнар Г.В., Лущик П.Е. Решение задачи оптимизации состава шихты методами линейного программирования. Литье и металлургия. 2006 (2–1). С. 154–157.
31. Леонович Б.И. Программный комплекс для моделирования процесса выплавки коррозионных марок стали / Б.И. Леонович, В.В. Натальченко, Б.В. Ощепков, Е.А. Трофимов // Вестник ЮУрГУ. 2010. № 13. С. 19–23.
32. Пелых С.Г. Расчет оптимального состава шихты. Литейное производство. 1983. № 6. С. 5–7.
33. Карпов П.М. Приближенный расчет металлических шихт графоаналитическим способом. Литейное производство. 1962. № 10. С. 39.
34. Горбунов А.И. Расчет шихты для плавки металлов / А.И. Горбунов, В.П. Сабуров, А.А. Родин и др. // Омск: ОПИ. 1975. 77 с.
35. Пономаренко О.И., Пелих В.Ф., Никифоров А.В. Методы расчета шихты для выплавки литейных сплавов. Системный подход. К.: ИСИО Украины. 1993. 74 с.
36. Рибак В.М., Чорнозем Д.С. Розрахунок шихти за допомогою пакету пошуку рішення середовища MS EXCEL. Матеріали IX Міжнародної науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». Київ, НТУУ «КПІ». 2011. С. 308–321.
37. Кириченко В.М. Расчет оптимального состава шихтовых материалов методами линейного программирования.  
<http://masters.donntu.ru/2007/kita/kirichenko/library/b7.html>

38. Соколов Д.Д., Приходько О.В. Алгоритм і програма розрахунку та корекції складових шихти при отриманні високоміцного чавуну для виливниць. Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. 2017. № 2 (41). С. 145–149.
39. Рубинштейн Э.Г., Зайцев М.В. Оптимизация состава шихты и свойств высокопрочного чугуна // Литейное производство. 1989. № 10. С. 14–15.
40. Малыхин И.А., Вдовин К.Н., Милуков С.В. Расчет на ЭВМ оптимального состава шихты. Литейное производство. 1980. № 10. С. 15–16.
41. 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.
42. Мазур В.Л. Задачі ливарних підприємств у відновленні інфраструктури України / В.Л. Мазур, Є.С. Попов, С.І. Клименко, К.А. Сіренко. Метал та лиття України. 2023. Т. 31. № 1 (332). С. 64–69.
43. Пономаренко О.И. Имитационно-вероятностные модели формовочных систем литейного цеха // Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. научн. трудов ХГПУ. Вып. 6. Ч.2. Харьков: Харьк. гос. политехн. ин-т. 1988. С. 516–519.
44. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Переваги та недоліки методів розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну в ливарному виробництві. Процеси лиття. 2023. № 3 (153). С. 49–60.
45. Тэн Э.Б., Коль О.А. Зависимость отбела чугуна от его углеродного эквивалента // Изв. вуз. Черная металлургия, 2020. № 1. С. 57–62.
46. Баженов В.Е., Пикунов М.В. Определение углеродного эквивалента чугунов с помощью программы thermo-calc // Изв. вуз. Черная металлургия. 2011. № 11. С. 20–23.
47. Сиренко Е.А. Характеристика химического состава и свойств синтетического чугуна для тормозных колодок локомотивов // Труды 29-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия-2021. Беларусь». Минск, 17–19 ноября 2021. С. 140–143.

48. Сіренко К.А. Коефіцієнти тертя між колесами залізничного транспорту і гальмовими колодками з чавуну та композиційного матеріалу: порівняльний аналіз // Метал та лиття України (Met. lit'e Ukr.), 2022. Т.30. № 1 (328). С. 91–100.
49. Смирнов А.Н., Лейрих И.В. Производство отливок из чугуна. Монография. Донецк. Норд-Пресс, 2005. 245 с.
50. Chen, Li. Current situation and development of thermal analysis technology and sample cup / Li Chen, Li Dayong, Shi Dequan, LuBoshi // The 6-th International Forum on Strategic Technology. 2011, August 22–24, pp. 108–111. DOI:10.1109/IFOST.2011.6020978.
51. Справочник по машиностроительным материалам. Под ред. Г.И. Погодина-Алексеева // М.: Машиностроение. 1959. Том. 3, 360 с.
52. Лоза А.В. О влиянии кремния и марганца на свойства серого чугуна и стойкость крупных слябинговых изложниц с бандажами / А.В. Лоза, В.В. Чигарев, В.В. Шишкин, Д.А. Рассохин // Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки. 2011. 2 (23). С. 238–244.
53. Дёмин Д.А. Исследование прочности чугуна с пластинчатым графитом в факторном пространстве «углерод (C) – углеродный эквивалент (Секв)» в диапазонах  $C = (4,214–4,372) \%$  // Технологічний аудит та резерви виробництва, 2017. № 1/1 (33).
54. Справочник по чугунному литью // Под ред. Н.Г. Гиршовича. Л.: Машиностроение, 1978. 758 с.
55. Сіренко К.А., Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві // Процеси лиття, 2023 Том 151. № 1. С. 20-34. DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020>
56. Жуков Л.Ф. Инновационные технологии экспрессного контроля температуры и химического состава железоуглеродистых сплавов / Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, Д.А. Петренко, Э.В. Захарченко, Е.А. Сиренко // Металл и литье Украины, 2018. № 11–12 (306–307). С. 43–53.

57. Сиренко Е.А. Особенности литейного чугуна для тормозных колодок железнодорожного транспорта // *Литье и металлургия*, 2022. № 1. С. 43–48.  
<http://doi.org/10/21122/1683-6065-2022-/-43-48>.
58. Zakharchenko, E. New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality of Melts and Castings / E. Zakharchenko, E. Sirenko, A. Goncharov, A. Bogdan // *Journal of Casting and Materials Engineering*, 2019. Vol. 3. No. 2, pp. 31–42.  
<http://dx.doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.31>.
59. Захарченко Э.В. Усовершенствование универсального метода термического экспресс-анализа жидких чугунов, основанного на распознавании формы кривых охлаждения / Э.В. Захарченко, Л.Д. Жуков, Е.А. Сиренко, А.В. Богдан, А.Л. Гончаров, Е.В. Кравченко // *Процессы литья*, 2015. № 2. С. 3–9.
60. [www.electro-nite.be](http://www.electro-nite.be). «Thermal Analysis Principles and Applications»  
[https://www.heraeus.com/media/media/hen/media\\_hen/products\\_hen/iron/thermal\\_analysis\\_of\\_cast\\_iron.pdf](https://www.heraeus.com/media/media/hen/media_hen/products_hen/iron/thermal_analysis_of_cast_iron.pdf).
61. Ольшевский А.А. Исследование тормозных колодок железнодорожных вагонов с целью повышения их эксплуатационных качеств // Автореферат дис. канд. наук. Днепропетровск, 1959. 11 с.
62. Худокормов Д.Н. Производство отливок из чугуна. Минск. «Высшая школа», 1987. 198 с.
63. Климов А.А. Исследование влияния структуры и твердости тормозных колодок на износ бандажей колес локомотивов / А.А. Климов, С.В. Домнин, А.В. Стручков, В.Б. Бондарик // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2017. № 1(53). С. 215–218.
64. Wang, Q., Li, Y.X., Li, X.C. Grain refinement of Al-7Si alloys and the efficiency assessment by recognition of cooling curves // *Metallurgical and Materials Transactions*, 2003. Vol. 34 A, pp. 1175–1182.

65. Sun, X., Li, Y., Chen, X. Identification and evaluation level for compacted graphite cast iron // *Journal of Materials Processing Technology*, 2008. Vol. 200, pp. 471–480.
66. Zhu, P., Smith, R.W. The prediction of microstructure of cast iron using the thermal analysis. *Mater. Sci. Forum*, 1996, pp. 215–216. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.215-216.503>.
67. Atas metstar: take control of your metallurgical process. URL: <https://www.novacast.se/wp-content/uploads/2015/06/product-brochure-atas-metstar.pdf>.
68. Li, Y.X., Xu, X.R., Wang, Q., Li, B.C. Evaluating melt iron features by computer aided recognition of thermal analysis cooling curves. *International Journal of Cast Metals Research*, 2003, 16 (1–3), pp. 41–45. DOI: 10.1080/13640461.2003.11819556.
69. Geng, H.Y. Effect of Boron on the eutectic solidification process of hypoeutectic Al-Si alloys / H.Y. Geng, Y.X. Li., X. Chen, X. Wang // *Scripta Materiala*, 2005. Vol. 53, pp. 69–73. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.03.011>.
70. Li, Z.H. Study on the Thermal Simulation of Solidification in Heavy Section Ductile iron / Z.H. Li, Y.X. Li, H.Y. Geng, J.J. Chen, C.Y. Zhou, J.F. Chen // *J. Mater. Sci. Technol*, 2003. № 19 (12), pp. 122–124.
71. Sun, X.J., Li, Y.X., Chen, X. Controlling melt quality of compacted graphite iron. *Mater. Sci. and Engineering*, 2007, A466, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.05.016>.
72. Dawson, S, Popelar, P. Thermal Analysis and Process Control for Compacted Graphite Iron and Ductile Iron // *Keith Millis Symposium on Ductile Cast Iron*, 2013, pp. 59–66. URL: [https://sintercast.com/media/1566\\_sintercast-thermal-analysis-and-process-control-for-compacted-graphite-iron-and-ductile-iron.pdf](https://sintercast.com/media/1566_sintercast-thermal-analysis-and-process-control-for-compacted-graphite-iron-and-ductile-iron.pdf).
73. Binczyk, F. An Assessment of the Derivative Thermal Analysis of Grey Cast Iron // *Archives of Foundry Engineering*, 2007. Vol. 7, № 3, pp. 21–24. URL:

[http://delibra.bg.polsl.pl/Content/31161/BCPS\\_34910\\_-An-assessment-of-the\\_0000.pdf](http://delibra.bg.polsl.pl/Content/31161/BCPS_34910_-An-assessment-of-the_0000.pdf) .

74. Persson, P. E. ATAS® as a tool for analyzing, stabilizing and optimizing the graphite precipitation in grey cast iron / A Udriou, P Vomacka, et al. // Proceedings 69th World Foundry Congress, FICMES, Hangzhou, China, 2010. URL: <https://www.researchgate.net/publication/267253820> .

75. Li Yanxiang, Wang Qiang. Intelligent evaluation of melt iron quality by pattern recognition of thermal analysis cooling curves // Journal of Materials Processing Technology. 2005, № 161 (3), pp. 430–434. DOI:10.1016/j.jmatprotec.2004.07.078

76. Stefanescu D.M., Sharez Ramon, Sung Bin Kim. 90 years of thermal analysis as a control tool in the melting of cast iron // Special Review «China Foundry». 2020. Vol. 17. No. 2. P. 69–84. DOI:10.1007/s41230-020-0039-x.

77. Silllen, R.V. Optimizing iron quality through artificial intelligence. – Modern Casting, 1996, 86. № 11, pp. 43–45.

80. Li, Y., Hu, X., Xu, X. Pattern Recognition on Thermal Analysis // J. Mater. Sci. Technol. 2001. Vol. 17. № 1, pp. 73–74.

78. Захарченко Э.В. Новый метод компьютерного термического экспресс-анализа качества жидких чугунов с предсказанием микроструктуры и свойств отливок при комнатных температурах/ Э.В. Захарченко, А.А. Бурбелко, Е.А. Сиренко, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан, М. Кавалец // Процеси лиття, 2019. № 3. С. 46–58.

79. Захарченко Э.В. Новый компьютерный метод термического экспресс-анализа качества жидких чугунов для предсказания микроструктуры и свойств отливок с использованием референсных кривых охлаждения / Э.В. Захарченко, А.А. Бурбелко, Е.А. Сиренко, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан // Материалы конференции «Современные тенденции развития металлургических и литейных технологий», г. Грозный, 2019. С. 25–26. DOI:10.34708/GSTOU.CONF.2020.94.94.003.



81. Chen, X., Geng, H., Li, Y. Assessment of modification level of hypoeutectic Al-Si alloys by pattern recognition of cooling curves // China Foundry, 2005. Vol. 2. № 4, pp. 246–253.
83. Chen, X., Geng, H., Li, Y. Study on the eutectic modification level of Al-7Si Alloy by computer aided recognition of thermal analysis cooling curves // Materials Science and Engineering, 2006. Vol. A 419, pp. 283–289.
83. Бялік О.М., Доній О.М., Голуб Л.В. Прогнозування властивостей металів і сплавів методом комп'ютерного термічного аналізу. Препринт. Київ. Політехніка, 2005. 114 с.
84. Li, Z.H., Li, Y.X. Evaluation of Melt Quality and Graphite Degeneration Prediction in Heavy Section Ductile Iron // Metallurgical and Materials Transactions. A, 2005, September. Vol. 36, pp. 2455–2459.
85. Соболев И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1978. 64 с.
86. Сіренко К.А. Характеристика твердості чавунних гальмових колодок залізничного транспорту // Метал та лиття України, 2022. Том 30. № 3 (330). С. 96-101. <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.0>
87. Мазур В.Л., Сіренко К.А. Економічні та екологічні аспекти використання гальмових колодок з чавуну чи композиційного матеріалу для залізничного транспорту // Процеси лиття, 2022. Том 149. № 3 С. 52–62.
88. Мазур В.Л. Развитие производства синтетического чугуна для деталей железнодорожного подвижного состава / В.Л. Мазур, О.И. Шинский, С.И. Клименко, Е.А. Сиренко, Е.С. Попов // Труды 29-й Международной научно-технической конференции «Литейное производство и металлургия – 2021. Беларусь». Минск, 17–19 ноября 2021. С. 17–20.
89. Сіренко К.А., Мазур В.Л., Дереча Д.О. Залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності // Метал та лиття України, 2023. Т. 31. № 2 (333). С. 42–50.
90. Коган Л.Б., Новик Ф.С., Виноградов Ю.Г. Изучение свойств синтетических чугунов с использованием методов математической статистики. М.: 1971. 76 с.

91. Клименко О.В. Стійкість і стабільність ринків небанківських фінансових послуг України // Економіка України. 2017. № 7. С. 49–63.
92. Муравьева И.Г. Создание интеллектуальных систем поддержки принятия решений по управлению доменной плавкой: новые подходы / И.Г. Муравьева, Д.Н. Тогобицкая, Ю.С. Семенова, Н.Г. Иванча, А.И. Белькова, Е.И. Шумельчик, Д.А. Степаненко // Киев. Наукова думка, 2019. 272 с.
93. Сіренко К.А. Удосконалення нормативно-технічної документації на ливарні вироби з чавуну // Процеси лиття, 2021. № 3 (145). С. 69–76.
94. Э.В. Захарченко. Термический анализ: nereкомендуемые термины и их заменители // Процессы литья, 2015. № 3. С. 72–73.
95. Захарченко Э.В. Современные методики деривативного технического анализа для исследования процессов затвердевания литых сплавов / Э.В. Захарченко, Л.Ф. Жуков, Е.А. Сиренко, В.Г. Писаренко, А.Л. Гончаров // Процессы литья, 2013. № 3. С. 42–50.
96. Смульська Е.А. (Сіренко К.А.), Варава І.А. Комп'ютерна програма «ThermoEXP». Свідоцтво про авторське право на твір № 17697 від 21.08.2006.
97. Патент України на корисну модель № 99968. Способ термического анализа жидкого чугуна / Э.В. Захарченко, Е.А. Сиренко, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан. Оpub. 25.06.2015. Бюл. № 12.
98. Патент України на винахід № 113333. Спосіб термічного аналізу рідкого чавуну / Э.В. Захарченко, Е.А. Сиренко, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан. Оpub. 10.01.2017. Бюл. № 1.
99. Захарченко Э.В. Индуктивные методы термического экспресс-анализа термических кривых охлаждения при идентификации сплавов / Э.В. Захарченко, Е.А. Сиренко, В.П. Кравченко, А.В. Богдан, Е.В. Кравченко // Матеріали XIII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Спеціальна металургія: вчора, сьогодні, завтра». Київ. НТУУ «КПІ», 21 квітня 2015. С. 108–110.

100. Жуков Л.Ф. Экспрессный по ходу плавки термографический контроль C и Si в чугунах / Л.Ф. Жуков, Э.В. Захарченко, А.Л. Гончаров, Е.А. Сиренко // Литье. Металлургия. 2014: Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции. Запорожье, 27–29 мая 2014. С. 79–80.
101. Жуков Л.Ф., Сиренко Е.А., Школярченко В.П. Термографический регрессионный экспресс-контроль C и Si в чугунах // XI Международная научно-практическая конференция «Литье. Металлургия-2015» в рамках XIII Международной специализированной выставки «Машиностроение. Металлургия. 2015» и XI Международной специализированной выставки «Литье-2015». Запорожье, 2015. С. 90–91.
102. Жуков Л.Ф. Обработка термограмм термического анализа металлических сплавов / Л.Ф. Жуков, А.А. Смольский, Д.Н. Анощенко, Е.А. Смольская (Е.А. Сиренко), А.А. Фролов // Материалы II Международной научно-практической выставки-конференции «Литье-2006». Запорожье, 2006. С. 85–86.
103. Жуков Л.Ф. Состояние и перспективы развития теплофизического экспресс-анализа металлических сплавов / Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, А.А. Смольский, Е.А. Смольская (Е.А. Сиренко) // Материалы II Международной научно-практической выставки-конференции «Литье-2006». Запорожье, 2006. С. 88–89.
104. Жуков Л.Ф., Гончаров А.Л. Комплекс методов и средств теплофизического экспресс-анализа металлических сплавов / Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, А.А. Смольский, В.В. Батальянец, Г.О. Антонов, Е.А. Смольская (Е.А. Сиренко) // Материалы III Международной научно-практической конференции «Литье-2007». Запорожье, 27–29 марта 2007. С. 118.
105. Жуков Л.Ф. Возможности и перспективы развития теплофизического экспресс-контроля металлических сплавов / Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, А.А. Смольский, Е.А. Смольская (Е.А. Сиренко) // Материалы III Международной

научно-практической конференции «Литье-2007». Запорожье, 27–29 марта 2007. С. 124–125.

106. Жуков Л.Ф. Установки экспрессного контроля химического состава и структуры металлических сплавов / Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, А.А. Смутьский, В.В. Батальянец, Г.О. Гончаров, Е.А. Смутьская (Е.А. Сиренко) // Тезисы докладов Международного научно-технического конгресса «Современные материалы и технологии в металлургии и машиностроении». ФТИМС. Киев, 21 сентября 2007. С. 122–123.

107. Жуков Л.Ф. Экспрессный теплофизический контроль металлических сплавов / Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, А.А. Смутьский, Е.А. Смутьская (Е.А. Сиренко) // Тезисы докладов Международного научно-технического конгресса «Современные материалы и технологии в металлургии и машиностроении». ФТИМС. Киев, 21 сентября 2007. С. 124–125.

108. Жуков Л.Ф. Термографический и термоэлектрический экспресс-анализ химического состава чугуна / Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, Э.В. Захарченко, Е.А. Сиренко // Материалы Международной научно-практической конференции-выставки «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». ФТИМС. Киев, 12–14 декабря 2011. С. 123–125.

109. Захарченко Э.В. Теплофизика современных методов термографического анализа экспресс-анализа металлических сплавов / Э.В. Захарченко, Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, Е.А. Сиренко // Литье. Металлургия. 2014: Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции. Запорожье, 27–29 мая 2014. С. 87–90.

110. Жуков Л.Ф., Сиренко Е.А., Захарченко Э.В. Регрессионный термографический экспресс-анализ химического состава металлических сплавов // «Литье-2017»: XIII Международная научно-практическая конференция, «Металлургия-2017»: VI Международная научно-практическая конференция. Материалы МНПК. Запорожье, 23–25 мая 2017. С. 88–90.

111. Жуков Л.Ф. Повышение метрологических характеристик термического анализа металлических сплавов вейвлет – преобразованием термограмм охлаждения / Жуков Л.Ф., А.А. Смутьский, Д.Н. Аношенко, Е.А. Смутьская (Е.А. Сиренко), А.А. Фролов // Материалы III Международной научно-практической конференции «Литье-2007». Запорожье, 27–29 марта 2007. С. 127–128.
112. Жуков Л.Ф. Повышение помехоустойчивости термографического экспресс-анализа металлических сплавов / Л.Ф. Жуков, Э.В. Захарченко, Е.А. Сиренко // Материалы Международной научно-практической конференции-выставки «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». ФТИМС. Киев, 12–14 декабря 2011. С. 116–117.
113. Вейник А.И. Испытания кокильных красок на теплопроводность / Монография. М.: Машгиз, 1956. 232 с.
114. Wendlandt, W.Wm. Thermal Analysis / Interscience Publication. 1964, 1974, 1986 // Уэндландт У. Термические методы анализа. М.: Мир, 1978. 515 с.
115. Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry // Vol. 1: Principles and Practice. M.E. Brown, editor. Elsevier Science B.V., 1998. 722 p.
116. Sun, Y.Z., Che, S.X., Chen, H.S. The influence of structure parameters of sampling cup on the precision of forecasting silicon content of cast iron // Foundry Technology, 1995, March, pp. 6–8.
117. Шумихин В.С. Высококачественные чугуны для отливок / В.С. Шумихин, В.П. Кутузов, А.И. Храмченков, И.А. Дибров, Н.Н. Александров, Ю.Г. Бобро, О.В. Пузырьков-Уваров, Н.К. Блошко // М.: Машиностроение, 1982. 222 с.
118. Chen, Li. Current situation and development of thermal analysis technology and sample cup / Li Chen, Li Dayong, Shi Dequan, LuBoshi // The 6-th International Forum on Strategic Technology. 2011, August 22–24, pp. 108–111. DOI:10.1109/IFOST.2011.6020978.
119. Pinca-Bretotean, C. Laboratory testing of brake pads made of organic materials intended for small and medium vehicles / C. Pinca-Bretotean, A. Josan,

C. Birtok-Băneasă // Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2018. № 393, pp. 1–7.

120. Захарченко Э.В. Методы, средства и материалы современной цветной металлографии сплавов / Э.В. Захарченко, Л.Ф. Жуков, Е.А. Сиренко // Литье. Металлургия. 2014: Материалы Юбилейной X Международной научно-практической конференции. Запорожье, 27–29 мая 2014. С. 90–92.

121. Захарченко Э.В., Сиренко Е.А. Современные технологии цветной металлографии чугуна // XI Международная научно-практическая конференция «Литье. Металлургия-2015» в рамках XIII Международной специализированной выставки «Машиностроение. Металлургия. 2015» и XI Международной специализированной выставки «Литье-2015». Харьков, 2015. С. 116–118.

122. Захарченко Э.В., Жуков Л.Ф., Е.А. Сиренко. Цветная металлография литых сплавов // Материалы Международной научно-практической конференции-выставки «Литейное производство: технологии, материалы, оборудование, экономика и экология». ФТИМС. Киев, 12–14 декабря 2011. С. 136–138.

123. Бялик О.М. Математическая модель затвердевания пробы для экспресс-анализа качества литейных сплавов методом термического анализа / О.М. Бялик, А.Н. Доний, Л.В. Голуб, А.И. Шаповал, В.С. Пиковский // Литейное производство, 1989. № 10. С. 12–13.

124. Захарченко Э.В. Тенденции оптимизации составов модификаторов MgLaFeSi для эффективного производства ЧШГ ковшовыми способами / Э.В. Захарченко, Е.А. Сиренко, Н.Ф. Зубенина, А.В. Богдан, И.Р. Баранов, Л.Д. Таранухина // Литво. Металургія. 2019: Матеріали XV Міжнародної науково-практичної конференції (21–23 травня 2019 р., м. Запоріжжя). 2019. С. 101–102.

125. Panping Zhu, R.W. Smith. Dynamic simulation of crystal growth by Monte Carlo method—I. Model description and kinetics // Acta metal. mater. 1992, Vol. 40, pp. 683–692.

126. Jinhua Gao, Raimond G. Thompson. Monte Carlo Simulation of Solidification // The Minerals, Metals and Materials Society, 1997, pp. 77–86.  
[https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/1997/Superalloys\\_1997\\_77\\_86.pdf](https://www.tms.org/Superalloys/10.7449/1997/Superalloys_1997_77_86.pdf)
127. Доній О.М. Комп'ютерні моделі для вивчення процесів формування структури у ливарних алюмінієвих сплавах при їх кристалізації // Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Київ. НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 2021. 395 с.
128. Тогобицкая Д. Н. Базы данных и модели для экспертной оценки эффективности использования ферросплавов при производстве стали / Д.Н. Тогобицкая, В. П. Пиптюк, А. Ф. Петров, С. В. Греков, И. Р. Снигура, Ю. М. Лихачев, Л. А. Головки // В сб. «Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии», 2017. Вып. 31. С. 150–165.
129. Бубликов В.Б., Бачинський Ю.Д., Нестерук О.П. Одержання високоміцних чавунів перлітного класу з підвищеними технологічними і механічними властивостями // Процеси лиття, 2024. № 1 (155). С. 3–13.
130. Сіренко К.А. Шляхи удосконалення методики термічного аналізу якості рідкого чавуну // Процеси лиття, 2022. № 2 (148 ). С. 50–55.
131. Сіренко К.А. Перспективи промислової реалізації методу РКО термічного експрес-аналізу якості рідкого чавуну з прогнозуванням мікроструктури і властивостей виливок / К.А. Сіренко, Е.В. Захарченко, А.Л. Гончаров, В.П. Школярєнко // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали й обладнання у ливарному виробництві». Краматорськ, ДДМА, 21–24 вересня 2021. С. 112–113.
132. Мазур В.Л., Найдєк В.Л., Попов Є.С. Характеристика чавунних композиційних колодок для рухомого складу залізниці в Україні // Литво. Металургія, 2021. Матеріали XVII Міжнародної науково-практичної конференції «Литво-2021». Запоріжжя, 2021. С. 118–122.
133. Shigeki Koriyama, Toshitake Kanno, Yuki Iwami, Iigoo Kang. Investigation of the Difference Between Carbon Equivalent from Carbon Saturation Degree and

that from Liquidus // International Journal of Metalcasting. Presentations at the Carl Lopes 2019 Cast Iron Symposium held September 30 to October 1, 2019, in Bilbao, Spain. <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00430-5>

134. Справочник по изготовлению отливок из высокопрочного чугуна / Под ред. А.А. Горшкова // М.; К.; Машгиз, 1961. 300 с.

135. Неижко И.Г. О теориях образования шаровидного графита // Кристаллизация, структурообразование и свойства модифицированного чугуна: Сб. К.: ИПЛ АН УССР, 1982. С. 3–14.

136. Баранов А.А., Баранов Д.А. К теории образования в чугуне шаровидного графита // Металл и литье Украины, 2003. № 9–10. С. 42–45.

137. Баранов Д. А. О механизме формирования вермикулярного графита при затвердевании чугуна // Литейное производство, 2004. № 10. С. 2–3.

138. Соценко О. В. Особенности формирования структуры графита в модифицированных чугунах // Литейное производство, 1983. № 12. С. 5–8.

139. Соценко О. В. Компьютерная DLA-модель формирования шаровидного графита в высокопрочном чугуне // Металл и литье Украины, 2009. № 9. С. 3–9.

140. Иванов В. Г., Голтвяница В.С. Морфологія графіту у заевтектичному синтетичному чавуні // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні, 2012. № 2. С. 23–27.

141. Плавка синтетического чугуна в индукционных печах и ее технология на Каунасском литейном заводе «Центролит» // Под ред. Н. Г. Гиршовича. Вильнюс: Минтис, 1974. 297 с.

142. Иванов Д. П. Синтетический чугун, свойства и методы его получения // Литейное производство, 1972. № 10. С. 1–5.

143. Пархоменко В.А., Бондаренко И.Н., Шульте Г.Ю. Совершенствование методов выплавки белого чугуна в индукционных печах ИЧТ-10 // Механизация и повышение эффективности технологических процессов производства отливок металлургического оборудования. Тез. докл. IV Республ. науч.-техн. конф. – Днепропетровск : ДМетИ, 1986. 77 с.



144. Кимстач Г.М., Шилова М.Н. Об особенностях сфероидизирующего модифицирования синтетического чугуна // *Металлургия, машиностроение*, 2006. № 5. С. 28–30.
145. Климов А.А., Стручков А.В. Результаты исследования влияния твердости и микроструктуры тормозных локомотивных колодок на экстремальное торможение локомотива // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2019. Т. 21. № 1. С. 71–76.
146. Климов А.А. Исследование графитных включений в микроструктурах чугуна тормозных локомотивных колодок / А.А. Климов, А.В. Стручков, В.Б. Бондарик, В.П. Ильинский, С.В. Домнин, В.П. Кирпиченко // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Машиностроение, материаловедение*. 2017. Т. 19, № 3. С. 19–33.
147. Климов А.А. Металлографическое исследование процесса трещинообразования в чугуне тормозных локомотивных колодок / А.А. Климов, А.В. Стручков, В.Б. Бондарик и др. // *Транспорт, транспортные сооружения, экология*. 2017. № 3. С. 94–106.
148. Андреев В.В. Особенности формирования литой структуры высокопрочных чугунов и разработка эффективных технологий изготовления отливок с высокими параметрами эксплуатационных свойств // *Диссертация в виде научного доклада на соискание ученой степени доктора технических наук*. М.: ОАО НПО «ЦНИИТМАШ», 2012. 79 с.
149. Александров Н.Н. Чугун с вермикулярным графитом / Н.Н. Александров, В.В. Андреев, Л.В. Ильчева, Б.С. Мильман. В кн. «Справочник по чугунному литью». Л.: Машиностроение, 1978. С. 79–81.
150. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов. М.: *Металлургия*, 1988. 288 с.
151. Тогобицкая Д.Н. Прогнозирование свойств ферросплавов для экспертной оценки эффективности их использования при доводке стали на

- УКП / Д.Н. Тогобицкая, В.П. Пиптюк, А.Ф. Петров, С.В. Греков, А.С. Миргородская // *Металлург*, 2018. № 11. С. 27–32.
152. Rousiere D., Aranzabal J. Development of mixed (ferritic-ausferritic) structures for spheroidal graphite irons // *Metallurgical Science and Technology*, 2000. Vol. 18 (1). P. 24–29.
153. Бубликов В.Б., Бачинский Ю.Д. Особенности распределения механических свойств высокопрочного чугуна по плавкам // *Процессы литья*, 2018. № 6. С. 16–24.
154. Чугун. Справочное издание // Под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. М.: *Металлургия*, 1991. 576 с.
155. Захарченко Э.В. Отливки из чугуна с шаровидным и вермикулярным графитом / Э.В. Захарченко, Ю.Н. Левченко, В.Г. Горенко, П.А. Вареник // Киев: *Наукова думка*, 1986. 248 с.
156. Чалмерс Б. Физическое металловедение. М.: *Металлургиздат*, 1963. 455 с.
157. Бунин К.П., Малиночка Я.Н. Таран Ю.Н. Основы металлографии чугуна. М.: *Металлургия*, 1969. 416 с.
158. Бунин К.П., Баранов А.А. Металлография. М.: *Металлургия*, 1970. 256 с.
159. Школярченко В.П. Комплекс переносних термометрів для контролю температури розплавів у ливарному виробництві / В.П. Школярченко, О.Г. Антонов, А.Л. Гончаров, К.А. Сіренко, Е.В. Захарченко // *Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективні технології, матеріали й обладнання у ливарному виробництві»*. Краматорськ, ДДМА, 21–24 вересня 2021. С. 143–144.
160. Humphreys, J.G. Rapid control test for carbon equivalent / *BCIRA J.* 1961. № 9, pp. 609–621.
161. Варава І.А. Інформаційні технології управління складним науковим експериментом в багатофазному середовищі // *Дис. канд. техн. наук*. Київ, Інститут кібернетики імені В.М. Глушкова НАН України. 2015. 237 с.

162. Токова О.В. Комп'ютерна технологія розв'язання задач індуктивного моделювання процесів охолодження металевих ливарних виробів // Автореферат дис. канд. техн. наук. Київ. Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України. 2021. 24 с.
163. Захарченко Э.В. Исследование теплот кристаллизации нелегированных чугунов // Автореферат дис. канд. наук. Киев. 1967. 19 с.
164. Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. М.: Металлургиздат. 1985. 446 с.
165. Кутузов С.В. Научные основы технологии производства электродной массы и процессов формирования самообжигающихся электродов электропечей / С.В. Кутузов, В.В. Деркач, М.И. Гасик, М.М. Гасик, Ю.С. Пройдак // Днепр: ЧМП «Економика», 2020. 656 с.
166. Приходько Э.В. Металлохимия многокомпонентных систем. М.: Металлургия, 1995. С. 320 с.
167. Величко Б.Ф. Металлургия марганца Украины / Б.Ф. Величко, В.А. Гаврилов, М.И. Гасик, С.Г. Грищенко, А.В. Коваль, А.Н. Овчарук // Київ: Техніка, 1996. 472 с.
168. Шафран Л.М. Токсиколого-гігієнічні та екологічні аспекти безпеки гальмівних систем рухомого складу залізничного транспорту. Частина 1. Міграція шкідливих речовин у довкілля / Л.М. Шафран, В.Л. Мазур, Д.В. Большой, О.Г. Пихтєєва, О.В. Третьякова, Є.А. Потапов, О.М. Третьяков, С.Г. Міхалькова // Актуальные проблемы транспортной медицины, 2022. № 1 (67). С. 7–18.
169. Шафран Л.М. Токсиколого-гігієнічні та екологічні аспекти безпеки гальмівних систем рухомого складу залізничного транспорту. Частина 2. Забруднення довкілля важкими металами та азбестом / Л.М. Шафран, В.Л. Мазур, Д.В. Большой, О.Г. Пихтєєва, О.В. Третьякова, Є.А. Потапов, О.М. Третьяков, Д.М. Пихтєєв // Актуальные проблемы транспортной медицины, 2022. № 2 (68). С. 15–26. <https://zenodo.org/record/6814948>

170. Мазур В.Л., Сіренко К.А. Техніко-економічна оцінка ефективності ливарної продукції з чавуну // Процеси лиття, 2024. № 1 (155). С. 72–80.
171. Мазур В.Л., Сіренко К.А. Проблемні питання стандартизації ливарної продукції (на прикладі стандартизації гальмових колодок залізничного транспорту) // Метал та лиття України, 2023. Том. 31. № 3 (334). С. 39–48.
172. Мазур В.Л., Сіренко К.А. Порівняльний аналіз стандартів на гальмові колодки залізничного транспорту з чавуну та композиційного матеріалу // Тези ХІХ Міжнародної науково-практичної конференції «Литво. Металургія. 2023». 10–12 жовтня 2023 р., Харків–Київ, ФТІМС. С. 132–135.

## **ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А

### Список опублікованих праць здобувача

**Статті у виданнях категорії А та у закордонних виданнях, які входять до наукометричних баз Web of Science Core Collection та/або Scopus:**

1. Zacharcenko E.V. Ladle and In-Mold Modification Methods For Obtaining Castings From Cast Irons With Various Graphite Morphology / E.V. Zacharcenko, O.I. Shinsky, G.A. Baglyuk, S.I. Klimenko, V.Y. Kurovsky, **E.A. Sirenko**, A.L. Gonharov // ISSN 1815-2066. Nauka innov. – 2019. – №15 (1), – pp. 53–62. (Scopus)

DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.01.053>.

2. Zakharchenko E.V. New Computer Method of Derivative Thermal Express Analysis of Cast Iron for Operational Prediction of Quality of Melts and Castings / E. Zakharchenko, **E. Sirenko**, A. Goncharov, A. Bogdan, A. Burbelko, M. Kawalec // Journal of Casting and Materials Engineering. – 2019. – Vol. 3. No. 2. – pp. 31–42. (Web of science)

DOI: <http://dx.doi.org/10.7494/jcme.2019.3.2.31>.

**Статті у фахових виданнях України:**

3. Жуков Л.Ф. Инновационные технологии экспрессного контроля температуры и химического состава железоуглеродистых сплавов / Л.Ф. Жуков, А.Л. Гончаров, Д.А. Петренко, Э.В. Захарченко, **Е.А. Сиренко** // Металл и литье Украины. – 2018. – № 11–12 (306–307). – С. 43–53.

4. Захарченко Э.В. Новый метод компьютерного термического экспресс-анализа качества жидких чугунов с предсказанием микроструктуры и свойств отливок при комнатных температурах / Э.В. Захарченко, А.А. Бурбелко, **Е.А. Сиренко**, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан, М. Кавалец // Процеси лиття. – 2019. – № 3. – С. 46–58.

5. **Сиренко К.А.** Удосконалення нормативно-технічної документації на ливарні вироби з чавуну // Процеси лиття. – 2021. – № 3 (145). – С. 69–76.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2021>

6. **Сиренко К.А.**, Мазур В.Л. Оцінка стабільності хімічного складу і механічних властивостей промислових партій синтетичного чавуну // Процеси лиття. – 2021. – № 4 (146). – С. 66–75.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003>

7. **Сиренко К.А.**, Мазур В.Л. Ідеологія коригування хімічного складу синтетичного чавуну в процесі виготовлення литва // Метал та лиття України. – 2021. – Т. 29. – № 4 (327). – С. 44–54.

DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.00>

8. **Сиренко Е.А.** Особенности литейного чугуна для тормозных колодок железнодорожного транспорта // Литье и металлургия. – 2022. – № 1. – С. 43–48.

DOI: <https://doi.org/1021122/1683-6065-2022-1-43-48>

9. **Сіренко К.А.** Коефіцієнти тертя між колесами залізничного транспорту і гальмовими колодками з чавуну та композиційного матеріалу: порівняльний аналіз // Метал та лиття України. – 2022. – Т. 30. – № 1 (328). – С. 91–100.

DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.01.09>

10. **Сіренко К.А.** Удосконалення технології коригування хімічного складу чавуну під час плавки в індукційних тигельних печах // Процеси лиття. – 2022. – № 1 (147). – С. 3–10.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.01.003>

11. **Сіренко К.А.** Розвиток методики визначення складу шихти для виплавлення чавуну в індукційних тигельних печах // Метал та лиття України. – 2022. – Т. 30. – № 2 (329). – С. 30–39.

DOI: <https://doi.org/10.15407/scin15.04.005>

12. **Сіренко К.А.** Шляхи удосконалення методики термічного аналізу якості рідкого чавуну // Процеси лиття. – 2022. – № 2 (148). – С. 50–55.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.02.04>

13. Мазур В.Л., **Сіренко К.А.** Економічні та екологічні аспекти використання гальмових колодок з чавуну чи композиційного матеріалу для залізничного транспорту // Процеси лиття. – 2022. – Том 149. – № 3. – С. 52–62.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2022.03.05>

14. **Сіренко К.А.** Характеристика твердості чавунних гальмових колодок залізничного транспорту. // Метал та лиття України. – 2022. – Т. 30. – № 3 (330). – С. 96–101.

DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2022.03.096>.

15. Мазур В.Л., **Сіренко Е.А.** Аналіз тенденцій виробництва литва з синтетичного чавуну (на прикладі порівняння гальмових колодок для рухомого складу залізниці, виготовлених з різних матеріалів) // Теорія і практика металургії. – 2022. – № 3. – С. 5–14.

[https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_03\\_2022\\_site.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_03_2022_site.pdf)

16. **Сіренко К.А.**, Мазур В.Л. Визначення вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну в ливарному виробництві // Процеси лиття. – 2023. – №1 (151). – С. 20–34.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.01.020>

17. Мазур В. Л., **Сіренко К.А.** Механізм тертя гальмівних колодок з чавуну та композиційного матеріалу по поверхні коліс залізничного транспорту // Науково-технічних журнал «Металознавство та обробка металів». – 2023. – Т. 29. – № 1. – С. 18–33.

DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2023.01.018>

18. Мазур В.Л. Задачі ливарних підприємств у відновленні інфраструктури України / В.Л. Мазур, Попов Є.С., Клименко С.І., **Сіренко К.А.** // Метал та лиття України. – 2023. – № 1 (332). – С. 64–69.

DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.01.06>

19. **Сіренко К.А.**, Мазур В.Л. Оцінка підходів до прогнозування властивостей синтетичного чавуну у ливарному виробництві // Науково-

технічних журнал «Металознавство та обробка металів». – 2023. – Т. 29. – № 2. – С. 24–35.

DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.023>

20. **Сіренко К.А.**, Мазур В.Л., Дереча Д.О. Залежність твердості та інших властивостей сірого чавуну від його вуглецевого еквівалента та ступеня евтектичності // Метал та лиття України. – 2023. – Т. 31. – № 2 (333). – С. 42–50.

DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.02.042>

21. **Сіренко К. А.**, Мазур В.Л. Прогнозування механічних властивостей сірого чавуну (ймовірнісний підхід) // Науково-технічних журнал «Металознавство та обробка металів». – 2023. – Т. 29. – № 3. – С. 19–30.

DOI: <https://doi.org/10.15407/mom2023.03.019>

22. **Сіренко К.А.**, Мазур В.Л. Переваги та недоліки методів розрахунку шихти для виплавки синтетичного чавуну в ливарному виробництві // Процеси лиття. – 2023. – № 3 (153). – С. 49–60.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.03.049>

23. Мазур В.Л., **Сіренко К.А.** Проблемні питання стандартизації ливарної продукції (на прикладі стандартизації гальмових колодок залізничного транспорту) // Метал та лиття України. – 2023. – Vol. 31. – № 3 (334). – С. 39–48.

DOI: <https://doi.org/10.15407/steelcast2023.03.039>

24. **Сіренко К.А.**, Дереча Д.О., Мазур В.Л. Застосування методу Монте-Карло в розрахунках шихти й регулюванні хімічного складу чавуну в процесі його виплавлення // Процеси лиття. – 2023. – № 4 (154). – С. 44–57.

DOI: <https://doi.org/10.15407/plit2023.04.044>

#### ***Патент на корисну модель:***

25. Патент України на корисну модель № 99968. Спосіб термического анализа жидкого чугуна / Э.В. Захарченко, **Е.А. Сіренко**, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан. Опуб. 25.06.2015. – Бюл. № 12.

#### ***Патент на винахід:***

26. Патент України на винахід № 113333. Спосіб термічного аналізу рідкого чавуну / Э.В. Захарченко, **Е.А. Сіренко**, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан. Опуб. 10.01.2017. – Бюл. № 1.

#### ***Свідоцтво про авторське право на твір:***

27. Смульська К.А. (**Сіренко К.А.**), Варава І.А. Комп'ютерна програма «ТермоЕхр» / Свідоцтво про авторське право на твір. – № 17697 – 21.08.2006.

#### ***Праці, які засвідчують апробацію основних матеріалів дисертації Тези доповідей міжнародних науково-технічних конференцій:***

28. Жуков Л.Ф., **Сіренко Е.А.**, Школяренко В.П. Термографический регрессионный экспресс-контроль  $C$  и  $Si$  в чугуне // XI Международная научно-практическая конференция «Литье. Металлургия-2015» в рамках XIII Международной специализированной выставки «Машиностроение.



Металлургия. 2015» и XI Международной специализированной выставки «Литье-2015». – Запорожье, 2015. – С. 90–91.

URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/30301>

29. Захарченко Э.В. Новый компьютерный метод термического экспресс-анализа качества жидких чугунов для предсказания микроструктуры и свойств отливок с использованием референсных кривых охлаждения / Э.В. Захарченко, А.А. Бурбелко, **Е.А. Сиренко**, А.Л. Гончаров, А.В. Богдан // XV міжнародна науково-практична конференція «Литво 2019» VIII міжнародна науково-практична конференція «Металургія 2019», Запоріжжя. 21–23 травня 2019. – С. 99–100.

DOI: [10.34708/GSTOU.CONF.2020.94.94.003](https://doi.org/10.34708/GSTOU.CONF.2020.94.94.003)

30. **Сиренко К.А.** Ливарне виробництво: невирішені задачі та перспективи розвитку // «Перспективні технології, матеріали й обладнання в ливарному виробництві». Матеріали VIII науково-технічної конференції. – Краматорськ, 2021. ДДМА. – С. 109–110.

31. **Сиренко К.А.** Перспективні напрями розвитку методики визначення складу шихти при виплавленні чавуну // Збірник тез XIX міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2023», XII міжнародної науково-практичної конференції «Металургія 2023». – Харків – Київ, 2023 р. – С. 200–202.

32. Мазур В.Л., **Сиренко К.А.** Порівняльний аналіз стандартів на гальмові колодки залізничного транспорту з чавуну та композиційного матеріалу // Збірник тез XIX міжнародної науково-практичної конференції «Литво 2023», XII міжнародної науково-практичної конференції «Металургія 2023». – Харків – Київ, 2023 р. – С. 132–133.

33. **Сиренко К.А.**, Мазур В.Л. Ймовірнісний підхід до методології регулювання хімічного складу і прогнозування властивостей сірого синтетичного чавуну // International Scientific Conference «MININGMETALTECH – 2023. The mining and metals sector: integration of business, technology and education». – Izdevniecība Publishing. – 2023. – Vol. 1. – С. 116–119.

DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-361-3-36>

34. **Сиренко К.А.**, Мазур В.Л. Моделювання процедури визначення шихти і коригування складу розплаву чавуну (ймовірнісний підхід із застосуванням методу Монте-Карло) // Збірник тез Всеукраїнської науково-технічної конференції «Наука і металургія». – Дніпро, 2023. С. 85.

DOI: [10.52150/2522-9117-2022-conferens](https://doi.org/10.52150/2522-9117-2022-conferens)

## ДОДАТОК Б

**Таблиця - Хімічний склад чавуну, твердість НВ і міцність на злам  
гальмових колодок типу «М» промислових партій,  
вироблених ливарним заводом ТОВ «М-ЛИТ»**

Дата	№ партії	№ плавки	Вміст елементів у хімічному складі чавуну, % (за масою)					Твердість НВ	Руйнівна сила на злам, тс
			<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
24.06.20	20 01	88	2,89	1,20	0,76	0,74	0,035	235/235	21,0
25.06.20	20 01	90	2,99	1,12	0,72	0,67	0,032	241/241	19,8
25.06.20	20 01	91	2,93	1,17	0,76	0,68	0,032	255/285	19,18
30.06.20	20 01	95	2,88	1,08	0,70	0,67	0,034	302/302	13,6
02.07.20	20 01	98	2,93	1,15	0,68	0,63	0,033	235/241	21,0
03.07.20	20 02	100	2,90	1,07	0,79	0,68	0,036	241/255	15,47
03.07.20	20 02	101	2,96	1,17	0,81	0,63	0,033	229/229	21,66
07.07.20	20 02	104	2,92	1,20	0,92	0,71	0,041	241/241	17,33
07.07.20	20 02	105	2,89	1,20	0,87	0,72	0,037	241/241	16,1
08.07.20	20 02	107	2,88	1,20	0,90	0,77	0,042	262/255	16,7
08.07.20	20 02	108	2,89	1,20	0,88	0,67	0,044	255/269	16,7
08.07.20	20 03	109	2,90	1,20	0,89	0,69	0,035	262/269	18,6
09.07.20	20 03	110	2,94	1,20	0,87	0,73	0,040	269/269	18,6
09.07.20	20 03	111	2,92	1,20	0,85	0,68	0,040	285/285	16,7
09.07.20	20 03	112	2,90	1,20	0,83	0,72	0,040	285/293	14,9
10.07.20	20 03	113	2,87	1,18	0,88	0,72	0,038	248/248	21,0
10.07.20	20 03	115	2,89	1,19	0,91	0,72	0,039	229/229	19,8
10.07.20	20 03	116	2,84	1,19	0,87	0,74	0,038	235/241	18,0
13.07.20	20 04	117	2,87	1,17	0,91	0,76	0,038	262/262	18,0
13.07.20	20 04	118	2,86	1,20	0,91	0,73	0,039	302/302	13,2
13.07.20	20 04	119	2,86	1,20	0,91	0,71	0,038	285/302	13,1
13.07.20	20 04	121	2,85	1,20	0,90	0,73	0,036	255 /255	16,1
14.07.20	20 04	122	2,89	1,20	0,88	0,67	0,031	255/255	16,1
14.07.20	20 04	123	2,88	1,20	0,80	0,72	0,036	241/241	14,9
14.07.20	20 04	124	2,93	1,20	0,85	0,64	0,032	229/235	17,33
15.07.20	20 04	125	2,89	1,17	0,89	0,73	0,036	229/229	18,6
15.07.20	20 04	126	2,89	1,20	0,88	0,69	0,035	229/229	18,0
15.07.20	20 04	127	2,93	1,19	0,86	0,72	0,035	248/255	15,5
20.07.20	20 05	130	2,90	1,20	0,82	0,72	0,037	235/255	18,0
20.07.20	20 05	131	2,87	1,17	0,83	0,83	0,035	285/293	13,1
20.07.20	20 05	132	2,90	1,19	0,83	0,74	0,037	248/255	18,0

## Продовження 1 Додатку Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
21.07.20	20 05	133	2,89	1,15	0,90	0,67	0,030	255/285	18,6
21.07.20	20 05	134	2,90	1,17	0,91	0,71	0,037	269/285	16,1
21.07.20	20 05	135	2,87	1,14	0,94	0,71	0,034	269/269	13,6
22.07.20	20 06	136	2,90	1,18	0,85	0,75	0,034	269/277	17,3
22.07.20	20 06	137	2,87	1,20	0,87	0,71	0,032	255/255	17,3
22.07.20	20 06	138	2,93	1,20	0,88	0,73	0,030	248/255	18,6
23.07.20	20 06	139	2,90	1,16	0,93	0,71	0,034	248/255	18,6
27.07.20	20 07	141	2,89	1,14	0,85	0,69	0,035	285/302	15,5
28.07.20	20 07	143	2,86	1,18	0,80	0,76	0,033	235/241	18,0
28.07.20	20 07	144	2,88	1,20	0,91	0,69	0,027	241/255	18,6
28.07.20	20 07	145	2,86	1,16	0,90	0,71	0,027	229/241	13,0
29.07.20	20 08	146	2,89	1,17	0,89	0,67	0,027	235/241	18,6
29.07.20	20 08	147	2,85	1,17	0,87	0,75	0,027	235/241	18,6
29.07.20	20 08	148	2,90	1,15	0,89	0,67	0,025	255/302	16,7
31.07.20	20 08	151	2,85	1,19	0,87	0,72	0,024	255/269	18,0
31.07.20	20 09	152	2,88	1,09	0,89	0,68	0,023	229/235	18,6
31.07.20	20 09	153	2,85	1,20	0,94	0,72	0,024	255/255	16,7
01.08.20	20 09	154	2,89	1,18	0,96	0,72	0,024	277/285	18,0
01.08.20	20 09	155	2,87	1,14	0,89	0,73	0,025	248/248	16,7
01.08.20	20 10	156	2,95	1,18	0,94	0,71	0,025	255/269	14,9
03.08.20	20 10	157	2,94	1,15	0,84	0,68	0,030	235/241	18,6
03.08.20	20 10	158	2,91	1,18	0,85	0,68	0,023	229/241	19,8
03.08.20	20 10	159	2,87	1,20	0,94	0,69	0,024	229/241	17,3
04.08.20	20 11	160	2,91	1,13	0,84	0,71	0,027	248/255	18,6
04.08.20	20 11	161	2,89	1,19	0,87	0,69	0,029	241/248	19,8
04.08.20	20 11	162	3,14	1,18	0,87	0,77	0,026	229/235	18,0
05.08.20	20 11	163	2,87	1,17	0,89	0,68	0,034	235/241	18,0
05.08.20	20 12	164	2,86	1,18	0,88	0,65	0,033	235/241	20,4
05.08.20	20 12	165	2,87	1,20	0,92	0,67	0,025	277/293	17,3
06.08.20	20 12	166	2,92	1,20	0,90	0,70	0,027	255/286	13,1
12.08.20	20 12	168	2,90	1,14	0,88	0,67	0,028	285/302	16,7
12.08.20	20 12	169	2,87	1,18	0,89	0,71	0,026	285/302	13,1
12.08.20	20 12	170	2,90	1,19	0,86	0,68	0,025	235/241	14,9
13.08.20	20 13	171	2,93	1,17	0,90	0,65	0,030	241/255	17,3
13.08.20	20 13	172	2,89	1,16	0,87	0,66	0,027	241/293	13,0
13.08.20	20 13	173	2,79	1,16	0,83	0,61	0,027	285/302	18,0
14.08.20	20 13	174	2,87	1,17	0,86	0,63	0,030	229/235	18,0
14.08.20	20 13	175	2,90	1,20	0,89	0,66	0,028	241/285	16,7
14.08.20	20 13	176	2,89	1,18	0,82	0,71	0,032	285/302	14,9
26.08.20	20 17	193	2,96	1,17	0,82	0,69	0,025	229/235	18,6

## Продовження 2 Додатку Б

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
26.08.20	20 17	194	2,89	1,20	0,91	0,69	0,029	229/241	18,0
26.08.20	20 17	195	2,95	1,18	0,90	0,74	0,023	255/269	18,6
01.09.20	20 19	202	2,88	1,19	0,88	0,69	0,028	235/241	18,0
01.09.20	20 19	203	2,94	1,18	0,90	0,70	0,028	241/248	18,0
01.09.20	20 19	204	2,94	1,19	0,88	0,72	0,026	248/255	17,3
01.09.20	20 19	205	2,96	1,18	0,84	0,70	0,028	241/248	19,2
01.09.20	20 19	206	3,00	1,15	0,88	0,69	0,026	269/293	18,6
01.09.20	20 20	207	2,95	1,19	0,87	0,71	0,026	241/248	19,2
03.09.20	20 20	210	2,88	1,15	0,87	0,65	0,024	241/248	21,7
03.09.20	20 20	211	2,89	1,16	0,83	0,77	0,029	248/255	20,4
03.09.20	20 20	212	2,94	1,19	0,81	0,68	0,021	255/269	18,0
03.09.20	20 20	213	2,87	1,16	0,92	0,61	0,021	241/255	13,6
09.09.20	20 22	219	2,89	1,16	0,87	0,66	0,020	248/255	20,4
09.09.20	20 22	220	2,80	1,17	0,88	0,62	0,020	286/293	17,3
09.09.20	20 22	221	2,92	1,17	0,86	0,62	0,020	255/269	17,3
16.09.20	20 24	229	2,88	1,19	0,85	0,67	0,020	262/293	13,0
16.09.20	20 24	230	2,87	1,20	0,89	0,67	0,021	269/285	13,6
17.09.20	20 25	234	2,86	1,16	0,87	0,65	0,026	235/241	18,9
18.09.20	20 25	235	2,80	1,16	0,91	0,69	0,024	248/248	18,9
18.09.20	20 25	236	2,85	1,19	0,92	0,66	0,030	235/241	20,4
18.09.20	20 25	237	2,83	1,14	0,85	0,66	0,031	241/241	18,6
01.10.20	20 29	258	2,93	1,19	0,86	0,73	0,029	248/255	18,6
01.10.20	20 29	259	2,90	1,13	0,85	0,73	0,029	241/248	17,3
01.10.20	20 29	260	2,95	1,20	0,88	0,77	0,035	262/286	13,6
04.11.20	20 38	306	2,86	1,12	0,81	0,66	0,032	241/248	20,4
04.11.20	20 38	307	2,80	1,20	0,87	0,67	0,028	241/255	17,3
04.11.20	20 38	308	2,91	1,04	0,92	0,72	0,033	277/293	16,7
06.11.20	20 38	309	2,86	1,07	1,85	0,64	0,035	285/293	18,6
11.11.20	20 41	321	2,87	1,16	0,96	0,79	0,036	241/255	21,7
11.11.20	20 41	322	2,85	1,12	0,89	0,75	0,035	248/262	19,8
11.11.20	20 41	323	2,76	1,16	0,62	0,68	0,028	248/262	18,0
11.11.20	20 41	324	2,83	1,12	0,79	0,71	0,025	241/2255	16,7
13.11.20	20 44	329	2,81	1,18	0,87	0,82	0,033	262/277	17,3
13.11.20	20 44	330	2,76	1,18	0,87	0,74	0,038	269/285	19,2

## ДОДАТОК В

Таблиця - Хімічний склад і твердість НВ чавуну СЧ350 промислових партій  
«клину Ханіна», вироблених ливарним заводом ТОВ «М-ЛИТ»

Дата	№ плавки	Вміст елементів у хімічному складі чавуну, % (за масою)					Твердість НВ
		<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	
1	2	3	4	5	6	7	8
02.04.2021	39539	3	1,26	0,89	0,041	0,034	255/248
02.04.2021	39904	2,99	1,21	0,84	0,044	0,033	255/255
07.04.2021	43191	3	1,43	0,9	0,033	0,027	248/248
08.04.2021	38079	2,91	1,43	0,81	0,039	0,03	248/255
09.04.2021	40270	2,87	1,24	0,78	0,035	0,033	248/248
12.04.2021	40635	2,86	1,46	0,86	0,042	0,033	241/248
13.04.2021	41731	2,96	1,17	0,81	0,63	0,033	255/248
13.04.2021	42096	2,9	1,39	0,83	0,032	0,03	255/248
14.04.2021	42827	2,99	1,37	0,87	0,04	0,031	248/248
14.04.2021	43192	3	1,35	0,84	0,03	0,032	241/235
15.04.2021	43923	2,91	1,36	0,9	0,031	0,028	248/241
15.04.2021	44288	2,99	1,3	0,84	0,034	0,03	255/248
23.04.2021	36984	2,92	1,27	0,77	0,035	0,029	248/248
26.04.2021	38080	2,95	1,47	0,96	0,034	0,025	248/255
28.04.2021	38445	2,97	1,51	0,97	0,082	0,097	255/263
29.04.2021	38810	3	1,25	0,82	0,032	0,029	248/255
30.04.2021	39175	3	1,35	0,84	0,025	0,015	248/248
05.05.2021	37012	3	1,44	0,82	0,031	0,029	255/255
06.05.2021	37742	3	1,48	0,87	0,029	0,025	241/248
07.05.2021	38108	2,99	1,36	0,87	0,029	0,026	248/255
19.05.2021	38473	3,01	1,33	0,77	0,095	0,03	255/248
20.05.2021	38838	2,89	1,45	0,83	0,038	0,031	248/241
21.05.2021	39203	3	1,33	0,87	0,037	0,031	241/235
24.05.2021	39569	2,94	1,47	0,86	0,051	0,031	248/241
24.05.2021	39934	2,97	1,29	0,86	0,027	0,026	255/248
24.05.2021	40299	3	1,38	0,88	0,035	0,031	255/255
25.05.2021	40664	3	1,38	0,82	0,038	0,03	241/248
25.05.2021	41030	2,93	1,28	0,92	0,049	0,029	241/235
25.05.2021	41395	2,98	1,29	0,8	0,037	0,032	248/241
26.05.2021	41760	2,99	1,2	0,79	0,037	0,033	248/248

## Продовження 1 Додатку В

1	2	3	4	5	6	7	8
26.05.2021	42125	3	1,38	0,83	0,042	0,031	255/255
27.05.2021	42491	2,98	1,48	0,84	0,04	0,033	255/262
27.05.2021	42856	2,9	1,52	0,84	0,034	0,033	255/255
27.05.2021	43221	3,06	1,51	0,85	0,039	0,03	248/255
27.05.2021	43586	2,9	1,54	0,85	0,043	0,032	241/248
28.05.2021	43952	2,89	1,45	0,79	0,048	0,034	241/248
28.05.2021	44317	2,93	1,55	1	0,051	0,028	248/248
28.05.2021	44682	2,84	1,49	0,9	0,034	0,034	248/255
28.05.2021	45047	2,97	1,53	0,91	0,034	0,03	255/255
31.05.2021	45413	2,87	1,34	0,84	0,037	0,035	248/255
31.05.2021	45778	2,97	1,42	0,85	0,041	0,039	248/241
31.05.2021	46143	2,94	1,36	0,82	0,034	0,032	241/235
01.06.2021	37043	2,96	1,33	0,86	0,044	0,028	248/248
01.06.2021	37408	2,92	1,33	1,01	0,043	0,027	248/255
01.06.2021	37773	2,99	1,46	0,99	0,055	0,033	255/255
02.06.2021	38139	2,98	1,32	0,98	0,027	0,024	255/248
02.06.2021	38504	2,99	1,35	0,94	0,023	0,028	248/248
02.06.2021	38869	2,93	1,41	0,89	0,031	0,027	241/248
02.06.2021	39234	2,93	1,31	0,78	0,028	0,021	248/255
02.06.2021	39600	2,9	1,38	0,75	0,026	0,02	255/255
02.06.2021	39965	2,89	1,4	0,76	0,025	0,022	248/248
04.06.2021	40330	3	1,34	0,81	0,024	0,02	241/235
02.06.2021	40695	2,97	1,46	0,79	0,024	0,018	241/241
02.06.2021	41061	2,92	1,27	0,73	0,028	0,037	248/241
07.06.2021	41426	2,91	1,36	0,81	0,024	0,027	248/248
07.06.2021	41791	2,89	1,19	0,87	0,69	0,029	255/248
07.06.2021	42156	2,97	1,3	0,79	0,027	0,026	255/255
07.06.2021	42522	2,93	1,34	0,79	0,019	0,027	248/248
07.06.2021	42887	2,99	1,3	0,77	0,028	0,028	248/241
07.06.2021	43252	2,94	1,25	0,79	0,03	0,03	248/248
09.06.2021	43617	2,96	1,2	0,9	0,036	0,028	255/248
07.06.2021	43983	2,96	1,37	0,76	0,035	0,03	255/255
07.06.2021	44348	2,96	1,27	0,8	0,032	0,018	248/248
07.06.2021	44713	2,92	1,32	0,79	0,059	0,029	241/248
10.06.2021	45078	2,92	1,23	0,76	0,038	0,026	241/241
10.06.2021	45444	2,89	1,21	0,81	0,027	0,022	248/241
10.06.2021	45809	2,9	1,26	0,84	0,038	0,026	248/248
11.06.2021	46174	2,97	1,26	0,79	0,029	0,028	255/248
11.06.2021	46539	2,96	1,34	0,85	0,032	0,028	255/255

## Продовження 2 Додатку В

1	2	3	4	5	6	7	8
11.06.2021	46905	2,97	1,28	0,83	0,029	0,024	248/241
14.06.2021	47270	2,89	1,26	0,85	0,028	0,026	241/235
14.06.2021	37044	3	1,28	0,9	0,029	0,028	235/235
14.06.2021	37409	2,92	1,35	0,97	0,032	0,027	241/241
15.06.2021	37774	3	1,33	0,93	0,031	0,026	241/248
15.06.2021	38140	2,99	1,42	0,99	0,03	0,026	248/255
15.06.2021	38505	2,99	1,43	0,98	0,033	0,029	255/255
16.06.2021	38870	3,04	1,35	0,93	0,035	0,027	255/255
16.06.2021	39235	3	1,32	0,95	0,029	0,028	248/241
16.06.2021	39601	2,94	1,35	0,99	0,026	0,028	241/241
17.06.2021	39966	2,92	1,24	0,83	0,033	0,028	235/241
17.06.2021	40331	2,99	1,22	0,81	0,032	0,031	241/248
17.06.2021	40696	3	1,23	0,87	0,029	0,029	248/248
18.06.2021	41062	2,96	1,28	0,8	0,029	0,029	255/248
18.06.2021	41427	2,98	1,29	0,9	0,031	0,029	255/255
18.06.2021	41792	2,82	1,21	0,86	0,021	0,019	262/255
29.06.2021	45445	2,93	1,19	0,81	0,037	0,028	241/241
29.06.2021	45810	2,86	1,28	0,86	0,032	0,026	248/241
29.06.2021	46175	2,93	1,25	0,9	0,03	0,025	248/248
01.07.2021	37073	2,92	1,25	0,9	0,038	0,031	241/235
01.07.2021	37438	3	1,24	0,83	0,039	0,034	241/241
01.07.2021	37803	2,95	1,31	0,86	0,031	0,029	248/241
08.07.2021	43282	2,93	1,29	0,7	0,029	0,039	255/255
08.07.2021	43647	3	1,31	0,85	0,029	0,039	248/241
08.07.2021	43984	2,89	1,26	0,79	0,033	0,038	248/241
14.07.2021	37074	2,95	1,27	0,75	0,032	0,035	241/241
14.07.2021	37439	2,97	1,31	0,79	0,031	0,032	241/235
14.07.2021	37804	2,75	1,08	0,69	0,031	0,041	235/235
14.07.2021	38170	2,94	1,3	0,78	0,031	0,038	241/248
02.08.2021	37104	3	1,3	0,83	0,029	0,03	241/235
02.08.2021	37469	2,94	1,26	0,83	0,032	0,033	241/241
02.08.2021	37834	2,92	1,23	0,8	0,036	0,035	248/241
19.08.2021	37105	2,88	1,24	0,8	0,028	0,037	255/248
19.08.2021	37470	2,92	1,18	0,81	0,028	0,035	248/248
01.09.2021	37135	2,93	1,39	0,74	0,054	0,041	241/235
01.09.2021	37500	2,94	1,26	0,84	0,031	0,029	255/241
03.09.2021	39326	2,92	1,33	0,79	0,036	0,034	255/255
03.09.2021	39692	2,92	1,27	0,75	0,035	0,028	248/255

## ДОДАТОК Г

Масові частки вмісту (не більше, мас.,%) елементів у хімічному складі феросиліцію ФС65 відповідно до наданих сертифікатів, який був поставлений на ливарний завод ТОВ «М-ЛИТ» у 2019–2021 рр.

Дата	Вміст елементів у хімічному складі чавуну, % (за масою)						
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Al</i>
1	2	3	4	5	6	7	8
14.01.2019	0,068	64,10	0,42	0,03	0,01	0,38	1,33
23.01.2019	0,019	65,22		0,014	0,001		1,21
08.04.2019	0,019	65,22		0,014	0,001		1,21
17.04.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
26.04.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
23.05.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
15.05.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
17.05.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
06.06.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
10.06.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
13.06.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
24.06.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
28.06.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
11.07.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
17.07.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
24.07.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
29.07.2019	0,071	68,3	0,6	0,031	0,008		0,752
16.08.2019	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
19.08.2019	0,071	68,3	0,6	0,031	0,008		0,752
13.09.2019	0,071	68,3	0,6	0,031	0,008		0,752
06.11.2019	0,07	65,21	0,31	0,03	0,007		0,828
07.05.2020	0,019	65,22		0,014	0,001		1,21
10.09.2020	0,019	65,22		0,014	0,001		1,01
02.10.2020	0,09	64,9	0,3	0,018	0,011	0,354	1,3
28.10.2020	0,09	64,9	0,3	0,018	0,011	0,354	1,3
06.11.2020	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
14.11.2020	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
23.11.2020	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
07.12.2020	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
15.12.2020	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
22.12.2020	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36



## Продовження Додатку Г

1	2	3	4	5	6	7	8
05.01.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
13.01.2021	0,09	64,9		0,018	0,011		1,3
15.01.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
23.01.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
18.02.2021	0,12	44		0,022	0,008		1,8
01.03.2021	0,09	64,5		0,018	0,011		1,3
05.03.2021	0,09	65		0,03	0,02		1,82
09.03.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
11.03.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
12.03.2021	0,09	65		0,02	0,03		1,82
15.03.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
18.03.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
29.04.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
07.05.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
19.05.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
24.05.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
27.05.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
07.06.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
07.06.2021	0,09	64,3		0,04	0,01		1,95
11.06.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
18.06.2021	0,1	43,9	0,52	0,03	0,003	0,2	0,063
23.06.2021	0,09	65,3		0,02	0,02		1,82
12.07.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
21.07.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
27.07.2021	0,21	65,30		0,037	0,034		2,36
02.08.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
30.08.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
31.08.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
08.09.2021	0,09	65,3		0,02	0,02		1,82
15.09.2021	0,09	65,3		0,02	0,02		1,82
21.09.2021	0,09	65		0,03	0,02		1,82
25.09.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36
05.10.2021	0,19	65,35		0,016	0,009		2,37
07.10.2021	0,21	65,3		0,037	0,034		2,36

## ДОДАТОК Д

Масові частки вмісту (не більше, мас.,%) елементів у хімічному складі феромарганцю ФМн78 згідно з наданими сертифікатами, який був поставлений на ливарному завод ТОВ «М-ЛИТ» у 2018–2021 рр.

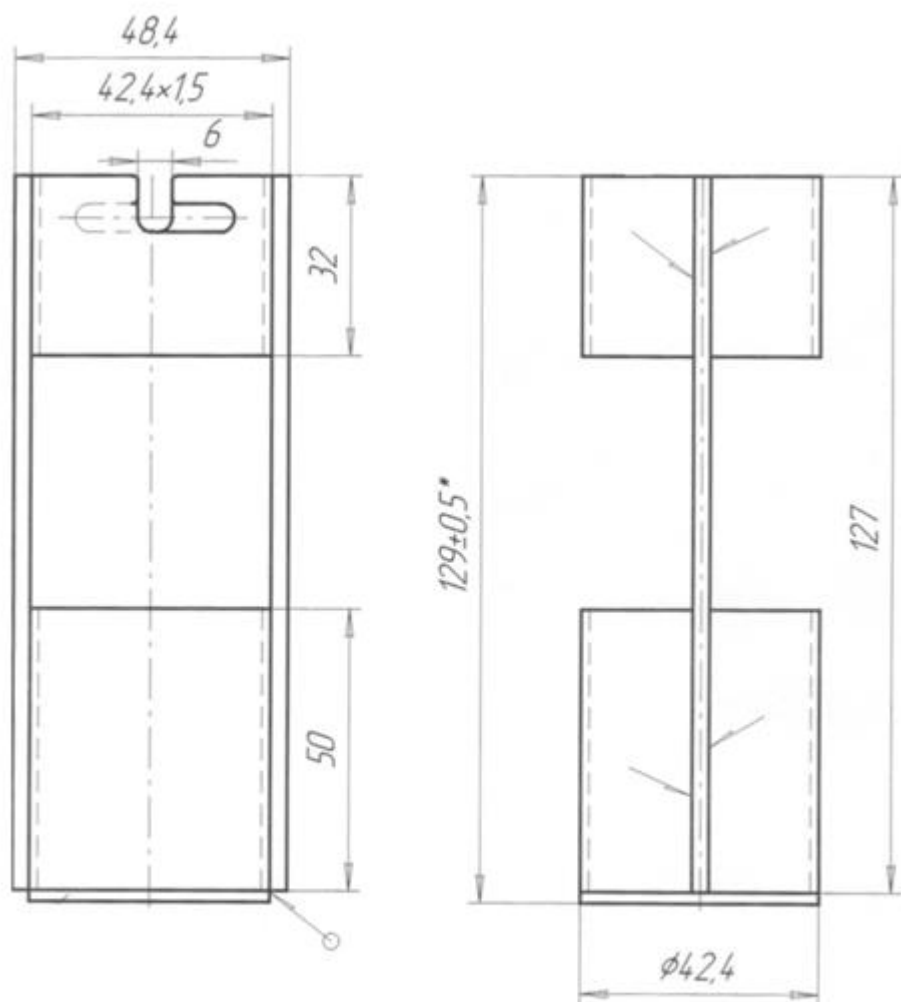
Дата	Вміст елементів у хімічному складі чавуну, % (за масою)				
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
1	2	3	4	5	6
15.03.2018	6,2	2,7	77,7	0,55	0,01
17.05.2018	6,2	2,7	77,7	0,55	0,01
09.07.2018	6,7	3,5	78	0,49	0,25
23.07.2018	6,2	2,7	77,7	0,55	0,01
03.08.2018	6,2	2,7	77,7	0,55	0,01
07.09.2018	6,2	2,7	77,7	0,55	0,01
24.09.2018	6,2	2,7	77,7	0,55	0,01
22.11.2018	6,2	2,7	77,7	0,55	0,01
22.12.2018	6,2	2,7	77,7	0,55	0,01
22.03.2019	6,61	0,73	77,4	0,36	0,02
26.04.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
15.05.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
23.05.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
31.05.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
13.06.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
02.07.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
11.07.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
17.07.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
23.12.2019	7	0,2	76,7	0,51	0,02
03.01.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
05.03.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
08.05.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
03.07.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
21.07.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
27.08.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
12.09.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
25.09.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
13.10.2020	7	0,2	76,5	0,5	0,03

## Продовження Додатку Г

1	2	3	4	5	6
06.11.2020	7	0,2	76,5	0,5	0,03
18.11.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
07.12.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
18.12.2020	7	0,2	76,7	0,51	0,02
28.12.2020	6,7	1,42	76,07	0,139	0,008
15.01.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
28.01.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
09.02.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
09.03.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
11.03.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
18.03.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
29.03.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
10.04.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
18.04.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
29.04.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
06.05.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
07.06.2021	6,65	4,12	77,62	0,33	0,02
22.06.2021	7	0,2	76,7	0,51	0,03
16.07.2021	6,7	1,42	76,07	0,139	0,008
10.08.2021	7	1,42	76,07	0,51	0,2
31.08.2021	7	0,2	76,5	0,5	0,03
14.09.2021	7	0,2	76,7	0,56	0,03
05.10.2021	7	0,2	76,5	0,6	0,04
19.10.2021	6,7	1,42	76,07	0,6	0,088

## ДОДАТОК Е

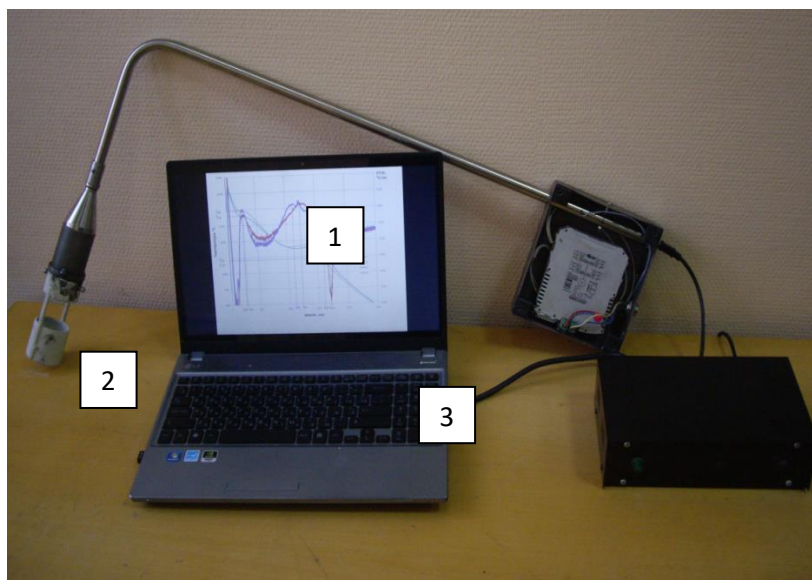
## Креслення металевого пробовідбірника рідкого металу нової конструкції



\* Вимірювальний розмір, рента для довідок

## ДОДАТОК Ж

### Компоненти діючої лабораторної установки удосконаленого термічного експрес-аналізу якості рідких чавунів



- 1 – Колінчатий зонд з вмонтованим АЦП, термороз'ємом та встановленим пробовідбірником з термоелектричним змінним пакетом.  
2 – ПК із програмою збору та обробки даних.  
3 – Модуль зв'язку з ПК.  
4 – Індукційна високочастотна піч 3 x 380 v.

## ДОДАТОК И

## Технічні характеристики модуля WAD-AIK-BUS

Параметри	Значення
1	2
Кількість вимірювальних каналів	4
Розрядність АЦП	24 біт
Вимірювання постійної напруги, одно- та двополярної (можливі межі):	0-15мВ, 0-30мВ, 0-60мВ, 0-125мВ, 0-250мВ, 0-500мВ, 0-1В, 0-2В, 0-5В, 0-10В, 0-20В, 0-40В, 0- 80В, 0-150В, 0-300В, 0-600В. (У багатограничному каналі найбільш чутлива та груба межі не повинні відрізнятися більш ніж у 128 разів)
Вимірювання сигналів термопар (типи)	В, Е, J, К, N, R, S, Т, інші обумовлені типи
Вимірювання опору	0-15 Ом, 0-30 Ом, 0-60 Ом, 0-125 Ом, 0-250 Ом, 0-500 Ом, 0-1к Ом, 0-2к Ом
Термометри опорів	ТСМ-50, ТСМ-100, ТСП-50, ТСП-100, інші
Вимірювання постійного струму, одно- та двополярного (можливі межі)	0-1мА, 0-2мА, 0-5мА, 1-5мА, 0-10мА, 0-20мА, 4-20мА, 0-50мА, 0-100мА, 0-200мА, 0-500мА, 0-1А, 0-2А, 0-5А
Похибка в режимі вимірювання напруги	< 0,05 %
Похибка вимірювання сигналів термопар	Не більше ніж 0,3 °С.

## Продовження Додатку И

1	2
Похибка вимірювання опору	0,07 % на межах 0-60Ом та більше.
Похибка з термоопірами	Не більше ніж 0,2 °С.
Похибка вимірювання струму	0,07 % у межах до 100мА, трохи більше 0,15 % інших
Додаткова температурна похибка	0,003 % на °С
Діапазон завдання частоти зрізу вхідного фільтра (встановлюється програмно)	0,5...50 Гц
Експлуатаційний температурний діапазон	-10...+75 °С
Допустима масова частка вологи	До 90 % без конденсації
Напруга живлення (постійна)	10–30 В
Споживана потужність не більше	1,5 Вт
Габарити	114 x 105 x 17, 5 мм
Вага	110 г
Інтерфейс зв'язку	RS-485, ModBus RTU

## ДОДАТОК К

## Копія титульної сторінки «Типової технологічної інструкції»

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ

Затверджую:



Директор ФТМС НАН України  
Член-кореспондент НАН України

Анатолій НАРІВСЬКИЙ

**ТИПОВА ТЕХНОЛОГІЧНА ІНСТРУКЦІЯ**  
**з контролю і регулювання хімічного складу чавуну в процесі його плавки в**  
**індукційних тигельних печах**  
**(Методологічні рекомендації)**

Заступник директора Інституту з  
наукової роботи, завідувач Відділу  
безперервного лиття та деформаційних  
процесів, доктор технічних наук

Олексій НОГОВІЩИН

Головний науковий співробітник,  
Член-кореспондент НАН України

Валерій МАЗУР

Директор Департаменту ливарного  
виробництва України, кандидат  
технічних наук

Степан КЛИМЕНКО

Відповідальний виконавець, молодший  
науковий співробітник

Катерина СІРЕНКО



МІНСТРАТЕГПРОМ  
№1.2-11.1/5740 від 21.12.2022  
КЕП: Можний О. В. 21.12.2022 12:39  
58E2D9E7F900307B04000000D05E32005B429600  
Сертифікат дійсний з 30.06.2021 10:08 до 30.06.2023 10:08

Київ – 2022р.



## ДОДАТОК Л

Довідка про використання результатів кандидатської дисертації Сіренко Катерини Адольфівни «Контроль і регулювання хімічного складу, прогнозування властивостей сірого чавуну в процесі його плавки та лиття» в промисловій практиці заводу ТОВ «М-ЛИТ»



ТОВ «М-ЛИТ»  
53221, Дніпропетровська обл., м. Нікополь  
вул. Електрометалургів, 300  
тел: (0566) 684578, 684576  
збут: (0566) 684581  
www.nzta.com.ua

19.02.2024 № 18/1

**Довідка**  
**про використання результатів дисертаційної роботи молодшого наукового**  
**співробітника Відділу безперервного лиття та деформаційних процесів**  
**Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України**  
**(ФТІМС) Сіренко Катерини Адольфівни за темою «Контроль і**  
**регулювання хімічного складу, прогнозування властивостей сірого чавуну**  
**в процесі його плавки та лиття»**

Технічні і технологічні рішення щодо вдосконалення процесу плавки та лиття чавуну, розроблені за результатами дисертаційної роботи К.А. Сіренко «Контроль і регулювання хімічного складу, прогнозування властивостей сірого чавуну в процесі його плавки та лиття» впроваджені у дослідно-промислову практику Відділу безперервного лиття та деформаційних процесів ФТІМС. Зокрема за рекомендаціями дисертаційної роботи отримали розвиток технологія формування шихти і методика регулювання режимів плавки металів (чавуну, сталі, алюмінію тощо).

Директор заводу ТОВ «М-ЛИТ»



**Є.С. Попов**

## ДОДАТОК М

Довідка про використання результатів дисертаційної роботи молодшого наукового співробітника Відділу безперервного лиття та деформаційних процесів Сіренко Катерини Адольфівни Фізико-технологічним інститутом металів та сплавів НАН України



**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

бульв. Акад. Вернадського 34/1, Київ, 03142. Тел./Факс: (044) 424-35-15.  
www.ptima.kiev.ua; e-mail: metal@ptima.kiev.ua  
Код ЄДРПОУ 05417153

26.02.2024

№ 87/09/72a

На № \_\_\_\_\_ від \_\_\_\_\_

**Довідка**

**про використання результатів дисертаційної роботи молодшого наукового співробітника Відділу безперервного лиття та деформаційних процесів Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України (ФТІМС) Сіренко Катерини Адольфівни за темою «Контроль і регулювання хімічного складу, прогнозування властивостей сірого чавуну в процесі його плавки та лиття»**

Технічні і технологічні рішення щодо вдосконалення процесу плавки та лиття чавуну, розроблені за результатами дисертаційної роботи К.А. Сіренко «Контроль і регулювання хімічного складу, прогнозування властивостей сірого чавуну в процесі його плавки та лиття» впроваджені у дослідно-промислову практику Відділу безперервного лиття та деформаційних процесів ФТІМС. Зокрема за рекомендаціями дисертаційної роботи отримали розвиток технологія формування шихти і методика регулювання режимів плавки металів (чавуну, сталі, алюмінію тощо).

Завідувач Відділу безперервного лиття  
та деформаційних процесів  
доктор технічних наук

О.В. Ноговіцин

Заступник директора  
Інституту з наукової роботи  
кандидат технічних наук

П.Б. Калужний

