

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ**

**СІРЕНКО КАТЕРИНА АДЛЬФІВНА**



УДК 621.745.55:669.162.6

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

Спеціальність 05.16.04 – ливарне виробництво

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2024

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Фізико-технологічному інституті металів та сплавів Національної академії наук України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, старший науковий співробітник

**Жуков Леонід Федорович**

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Пономаренко Ольга Іванівна**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»  
МОН України, м. Харків,  
професор кафедри ливарного виробництва;

доктор технічних наук, професор  
**Ямшинський Михайло Михайлович**  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського» МОН України, м. Київ, завідувач кафедри  
ливарного виробництва

Захист відбудеться 11 липня 2024 року об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01 при Фізико-технологічному інституті металів та сплавів НАН України за адресою:

03142, м. Київ, бул. Академіка Вернадського, 34/1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Фізико-технологічного інституту металів та сплавів НАН України за адресою:

03142, м. Київ, бул. Академіка Вернадського, 34/1.

Автореферат розісланий 10 червня 2024 року.

Вчений секретар

спеціалізованої вченої ради Д 26.232.01  
кандидат технічних наук

Жанна ПАРХОМЧУК

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**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, зазначена тема є 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», 2012–2014рр., 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 і задачі дослідження.** 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 ймовірного характеру формування хімічного складу та властивостей чавуну у процесі виготовлення ливарних виробів;
- дослідити кореляційні залежності механічних властивостей виливків з сірого 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.

**Наукова новизна отриманих результатів** теоретичних та експериментальних досліджень:

1. 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.

2. 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 розрахунків не враховують діапазони вмісту хімічних елементів у складі чавуну.

3. Удосконалено 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 визначати аргументи у задачах хімісклад-властивості виливків з чавуну.

4. 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 %

5. 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.**

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 авторкою дисертації, використовуються у практиці ливарного виробництва заводу ТОВ

«М-ЛИТ». Розроблена інструкція найшла застосування на цьому заводі при виготовленні ливарних виробів для залізничного рухомого транспорту.

Удосконалено метод самоадаптивного термічного деривативного експрес-аналізу чавунів, який дозволяє оперативно прогнозувати якість виливків, хімічний склад чавунів на етапі розплаву. Спосіб захищений патентом 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 дисертантки полягає в розробці теоретичних рішень та методик, проведенні експериментальних досліджень і аналізі їх результатів, формулюванні висновків і рекомендацій. Здобувачка приймала безпосередню участь у підготовці публікацій та обговоренні отриманих результатів на наукових конференціях. Експерименти в промислових умовах виконані при допомозі колег і персоналу підприємств. Дисертація виконана авторкою самостійно.

У роботах, які опубліковані у співавторстві, здобувачці належить наступне: дослідження властивостей чавуну при розробці нового методу ТДА і оцінці 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 здобувачці.

**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 р.); XI, XV Міжнародній науково-практичній конференції «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);

Міжнародна науково-технічна конференція «Miningmetaltch 2023 – Гірничо-металургійний комплекс: інтеграція бізнесу, технологій та освіти». (Запоріжжя, 2023).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 34 наукових праці, з них 22 у наукових фахових виданнях України, 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.

**Структура і обсяги роботи.** Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, переліку посилань із 172 найменувань і 10 додатків. Основна частина дисертації викладена на 175 сторінках, вміщує 53 рисунки, 16 таблиць. Загальний обсяг роботи 235 сторінок.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми та доцільність дисертаційної роботи. Сформульовано мету і завдання виконаного дослідження, визначено об'єкт, предмет, методи дослідження, представлено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено дані про апробацію та публікації результатів роботи.

У першому розділі проаналізовано сучасний стан методології систем і методів контролю та регулювання хімічного складу і властивостей сірого синтетичного чавуну. Розглянуто шляхи подальшого розвитку цього напрямку в теорії і технології ливарного виробництва.

Проаналізовано існуючі рішення щодо розрахунку шихти. Зазначено, що традиційна формула розрахунку обсягу  $\Delta q_M$  (кг) легувального матеріалу (модифікатора), необхідного для внесення у розплав при коригуванні хімічного складу чавуну, має вигляд:

$$\Delta q_M = \frac{100 \cdot q \cdot \Delta E}{E_M(100 - U_\Gamma)} = \frac{100 \cdot q (E_\Gamma - E_3)}{E_M(100 - U_\Gamma)}, \quad (1)$$

де  $q$  – обсяг (маса) розплаву чавуну, кг;  $E_\Gamma$  – відсотковий вміст хімічного елемента, який має бути у складі чавуну, %;  $E_3$  – вміст елемента в пробі розплаву за результатом заміру, %;  $\Delta E = |E_\Gamma - E_3|$  – величина, на яку необхідно змінити вміст елемента в чавуні, %;  $E_M$  – вміст хімічного елемента, що коригується, у матеріалі (модифікаторі), який додається в розплав чавуну, %;  $U_\Gamma$  – величина угару, %, елемента, що коригується, в процесі розплавлення доданого у розплав коригуючого матеріалу.

Зауважено, що змінні  $E_M$  і  $U_\Gamma$  у формулі (1) є величинами випадковими. Величини  $q$  і  $E_3$  на кожному етапі розрахунків приймаються за умовно постійні. За «точку прицілювання» у процедурі корекції вмісту конкретного хімічного елемента в чавуні вибирають значення  $E_\Gamma$  із заданого діапазону величин вмісту елемента у нормативному документі, згідно з яким виготовляють ливарну продукцію. Розрахунки  $\Delta q_M$  виконують із застосуванням методу Монте-Карло шляхом багаторазового повторення чисельного рішення рівняння (1) при випадково вибраних величинах  $E_M$  та  $U_\Gamma$  із сукупностей, що характеризують їхні

розподіли. На першому етапі розрахунків розмах варіювання величини  $E_M$  доцільно приймати рівним діапазону вмісту елемента в матеріалі, який застосовують для корекції хімічного складу чавуну. Діапазон розподілу величини угару  $U_T$  у процесі плавки чавуну приймати за даними виробничого досвіду конкретного підприємства.

Оскільки основними показниками хімічного складу чавунів є вуглецевий еквівалент  $C_{\text{екв}}$  і ступінь евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , які характеризують формування структури, технологічні (ливарні), механічні, експлуатаційні властивості виробів з чавуну, то розглядати ці показники доцільно у ймовірнісному підході, вважаючи їх випадковими величинами.

Показано, що недолік відомих емпіричних формул, призначених для орієнтовного розрахунку міцності й твердості чавуну за даними його вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності полягає у невизначеності методики розрахунку цих показників. Запропоновано використовувати у відповідних формулах математичні очікування (середні значення) величин вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності й відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію, визначені у ймовірнісному підході із застосуванням методу Монте-Карло.

Зазначено можливість застосування термічного деривативного аналізу, як структурно-чуттєвого експрес-методу визначення якості рідкого чавуну. Даний підхід надає змогу прогнозувати структуру і властивості майбутнього виливка ще на етапі розплаву, шляхом відбору проби рідкого металу, та оперативно скоригувати його хімічний склад у разі не відповідності вимогам.

**У другому розділі** представлені методики досліджень залежності механічних властивостей сірого чавуну від узагальнених показників його хімічного складу. Запропоновано і сформульовано методологію моделювання визначення складу шихти і коригування хімічного складу розплаву чавуну безпосередньо в процесі його виплавлення з позицій ймовірнісного підходу і використанням методу Монте-Карло.

Розвинуто тему визначення у ймовірнісному підході величин узагальнених показників чавуну (вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення  $C/Si$ ) і прогнозування на їх основі механічних властивостей виливків.

Дослідження проведені на прикладі сірого чавуну з пластинчастим графітом, який виплавляють згідно з вимогами ДСТУ 8833-2019. Вважали, що розподіли величин відсоткового вмісту хімічних елементів у чавуні в межах діапазонів, регламентованих у ДСТУ, відповідають нормальному закону Гаусса.

Результати розрахунків із застосуванням методу Монте-Карло ймовірних величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності чавуну з пластинчастим графітом різних марок, хімічний склад яких вказано у ДСТУ 8833-2019, представлені в табл. 1 разом з показниками їх твердості і коефіцієнта теплопровідності. Вуглецевий еквівалент розраховували за формулою  $C_{\text{екв}} = C + 0,3Si + 0,33P - 0,15Mn + 0,26S$ . Ступінь евтектичності за формулою  $S_{\text{евт}} = C/[4,3 - 0,3(Si + P)]$ .



Таблиця 1 – Показники вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$ , ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$ , твердості НВ, коефіцієнта теплопровідності чавунів з пластинчастим графітом

| 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,<br>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<br>теплопровідності, $\lambda$ ,<br>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 виливка не більше 50 мм; в знаменнику – при товщині не більше 30 мм.

Гістограми розподілу величини вуглецевого еквівалента хімічного складу чавуну марок СЧ100 і СЧ350, розраховані 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. 1.

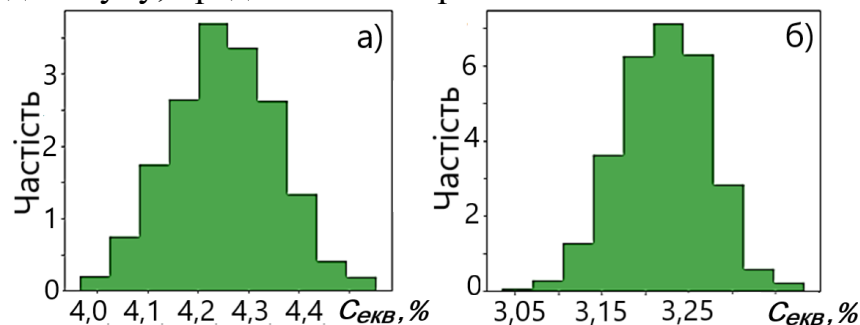


Рис. 1 Гістограми розподілу величин вуглецевого еквіваленту у чавунах марок СЧ100 і СЧ350, розраховані методом Монте-Карло для вмісту хімічних елементів у чавунах, передбачених у ДСТУ 8833:2019 (табл. 1). Кількість варіантів хімічного складу кожного чавуну при розрахунках параметрів їх розподілів дорівнювали 1000. Позначено: а) – СЧ100; б) – СЧ350

На рис. 2 представлено залежності твердості  $HV$  і коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda$ , за  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  чавунів СЧ 100...СЧА400 від їх вуглецевого еквіваленту  $C_{\text{екв}}$ , розрахованого за даними хімічного складу пластинчастого чавуну згідно з ДСТУ 8833-2019 (табл.1).

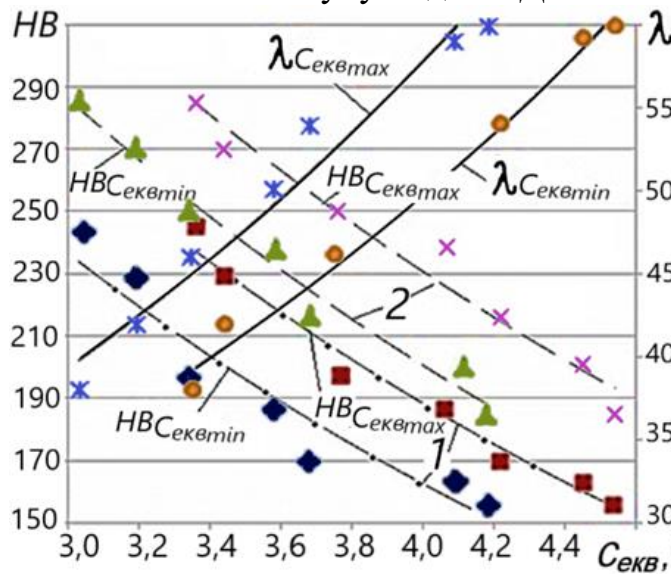


Рис. 2 Залежність твердості  $HV$  і коефіцієнтів теплопровідності  $\lambda$ , за  $20^\circ\text{C}$ ,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  чавунів СЧ100...СЧА400 від їх вуглецевого еквівалента

Позначено:  $C_{\text{еквmax}}$  – при максимальному значенні вуглецевого еквівалента;  $C_{\text{еквmin}}$  – при мінімальному; цифрою 1 – величини твердості  $HV$  при товщині стінки виливка не більше 50 мм; цифрою 2 – при товщині не більше 30 мм;  $\blacktriangle$  і  $\blacklozenge$  – твердість  $HV$  відносно  $C_{\text{еквmin}}$ ;  $\times$  і  $\blacksquare$  – відносно  $C_{\text{еквmax}}$ ;  $\times$  і  $\bullet$  –  $\lambda$  відносно  $C_{\text{еквmax}}$  і  $C_{\text{еквmin}}$ .

Встановлено, що міцність  $\sigma_B$ ,  $\text{Н}/\text{мм}^2$ , чавунів з пластинчастим графітом (відповідно до ДСТУ 8833-2019) збільшується при зменшенні вмісту вуглецю і вмісту кремнію у їх хімічному складі. Величина відношення  $C/\text{Si}$  зростає при переході від чавуну СЧ100 до СЧА400. Міцність сірого чавуну з пластинчастим графітом збільшується при збільшенні відношення  $C/\text{Si}$  і зменшенні величин вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  та ступеня евтектичності  $S_{\text{евт}}$ . Між собою величини  $C_{\text{екв}}$  і  $S_{\text{евт}}$  пов'язані прямою залежністю.

Залежності середньої величини вмісту кремнію  $\bar{Si}$  і відношення  $C/\text{Si}$  від середньої величини вмісту вуглецю  $\bar{C}$  у хімічному складі чавуну з пластинчастим графітом представлені на рис. 3. Зазначені залежності справедливі при зміні вуглецевого еквівалента хімічного складу і ступеня евтектичності чавуну в широких діапазонах, відмічених на рис. 2 і рис. 3.

При збільшенні вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності сірого чавуну з пластинчастим графітом, виготовленого у відповідності з вимогами ДСТУ 8833-2019, його твердість, як і міцність  $\sigma_B$ ,  $\text{Н}/\text{мм}^2$  зменшується. Але при відносно вузьких діапазонах розмаху величин вуглецевого еквівалента у промислових партіях чавуну, залежність твердості від вуглецевого еквівалента не проявляється. З підвищенням вмісту вуглецю і вуглецевого еквівалента у складі сірого чавуну з пластинчастим графітом величина відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію зменшується (рис. 3).

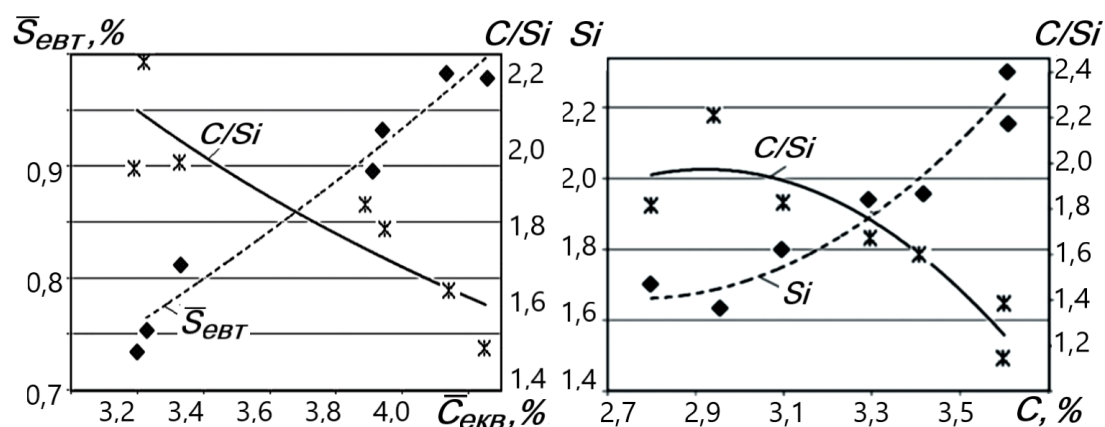


Рис. 3. Залежності середніх величин ступеня евтектичності  $\bar{S}_{евт}$ , вмісту кремнію  $\bar{Si}$  і відношення  $C/Si$  від середніх величин вуглецю  $\bar{C}$  і вуглецевого еквівалента  $\bar{C}_{екв}$  у чавуні з пластинчастим графітом (відповідно до ДСТУ 8833-2019)

У табл. 2 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 використані позначення, що й в табл. 1.

Таблиця 2 – Матриця кореляційних зв'язків (коефіцієнтів) між механічними властивостями ( $\sigma_B$ ,  $HB$ ) і показниками ( $C_{екв}$ ,  $S_{евт}$ ,  $C/Si$ ) хімічного складу сірого чавуну з пластинчастим графітом

|                           | $\sigma_B, \text{Н/мм}^2$ | $HB_{50}$ | $HB_{30}$ | $C_{екв}, \%$ | $S_{евт}$ | $C/Si$ |
|---------------------------|---------------------------|-----------|-----------|---------------|-----------|--------|
| $\sigma_B, \text{Н/мм}^2$ | 1                         |           |           |               |           |        |
| $HB_{50}$                 | 0,97288                   | 1         |           |               |           |        |
| $HB_{30}$                 | 0,99878                   | 0,97546   | 1         |               |           |        |
| $C_{екв}, \%$             | -0,09621                  | -0,93359  | -0,95447  | 1             |           |        |
| $S_{евт}$                 | -0,97751                  | -0,97392  | -0,9753   | 0,98669       | 1         |        |
| $C/Si$                    | 0,8789                    | 0,82832   | 0,88096   | -0,89601      | -0,87995  | 1      |

Залежності міцності  $\sigma_B, \text{Н/мм}^2$  та твердості  $HB$  для товщини стінки виливків 50 мм ( $HB_{50}$ ) і 30 мм ( $HB_{30}$ ) від вуглецевого еквівалента  $C_{екв}$ , ступеня евтектичності  $S_{евт}$  і відношення  $C/Si$ , розраховані з використанням ймовірнісного підходу при визначенні зазначених показників хімічного складу виливків з сірого чавуну представлені на рис. 4–7 Наведені також значення  $R^2$ , де  $R$  – коефіцієнти кореляції. Для порівняння на рис. 4 представлені залежності  $\sigma_B$ , розраховані за відомими формулами (позначені на рисунках без коефіцієнтів кореляції).

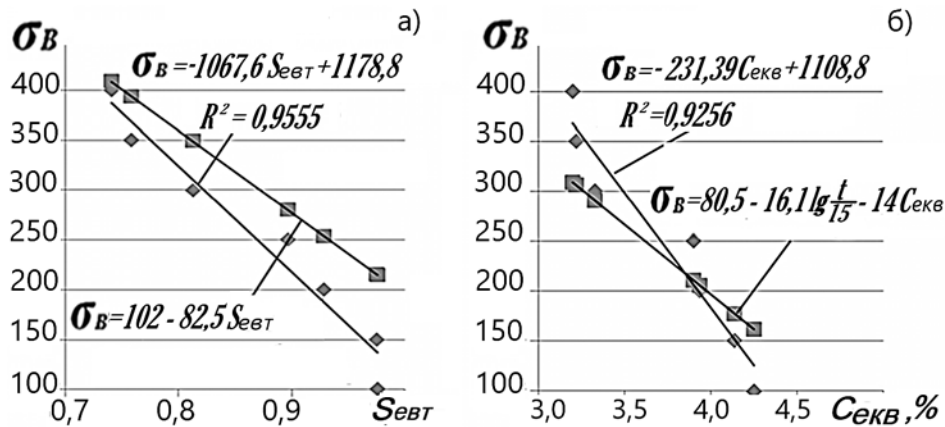


Рис. 4 Залежності міцності  $\sigma_B$ , Н/мм<sup>2</sup> (не менше ніж) від  $S_{евт}$  (а) і  $C_{екв}$ , %, (б) сірого чавуну з пластинчастим графітом. Позначено  $t$  – товщина виливка. Залежність  $\sigma_B = \varphi(C_{екв}, t)$  розрахована при  $t = 30$  мм

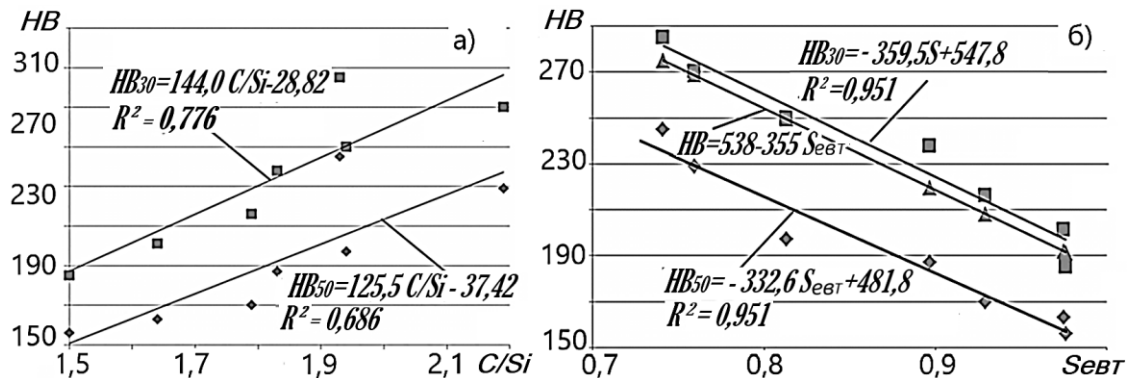


Рис. 5 Залежності твердості  $HB$  (не більше ніж) від величин: а) відношення  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у складі сірого чавуну з пластинчастим графітом; б) ступеня евтектичності  $S_{евт}$  сірого чавуну з пластинчастим графітом

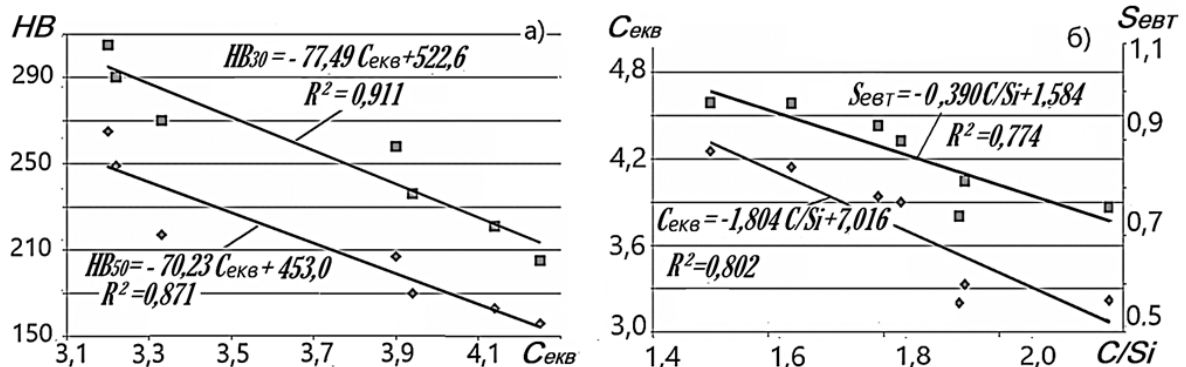


Рис. 6 Залежності: а) твердості  $HB$  (не більше ніж) від величини вуглецевого еквівалента  $C_{екв}$ , %; б) вуглецевого еквівалента  $C_{екв}$ , % і ступеня евтектичності  $S_{евт}$  від відношення  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у хімічному складі сірого чавуну з пластинчастим графітом

Представлені формули для розрахунку  $\sigma_B$  і  $HB$  виливків різної товщини в функції  $C_{екв}$ ,  $S_{евт}$ ,  $C/Si$  суттєво уточнюють аналогічні відомі формули завдяки представленню змінних у ймовірнісному визначенні величин показників хімічного складу чавуну. Запропонований підхід і отриманні рішення доцільно

запровадити у практичній діяльності ливарних підприємств при прогнозуванні якості литва.

Наведені у таблицях 1 і 2 та на рисунках дані свідчать, що величини міцності  $\sigma_B$  (не менше), твердості  $HB$  (не більше), вуглецевого еквівалента  $C_{екв}$  і ступеня евтектичності  $S_{евт}$  сірого чавуну з пластинчастим графітом, який виплавляють згідно з вимогами ДСТУ 8833-2019, тісно корельовані з відношенням  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у його хімічному складі. Величини  $C_{екв}$  і  $S_{евт}$  зменшуються з підвищенням відношення  $C/Si$ . Міцність  $\sigma_B$  і твердість  $HB$  виливків із сірого чавуну з хімічним складом за ДСТУ 8833-2019 збільшується при збільшенні відношення  $C/Si$ . Рівняння регресії, які відображають залежності  $C_{екв}(C/Si)$ ,  $S_{евт}(C/Si)$ ,  $\sigma_B(C/Si)$ ,  $HB(C/Si)$ , представлені на рис.5,а, 6,6 і 7.

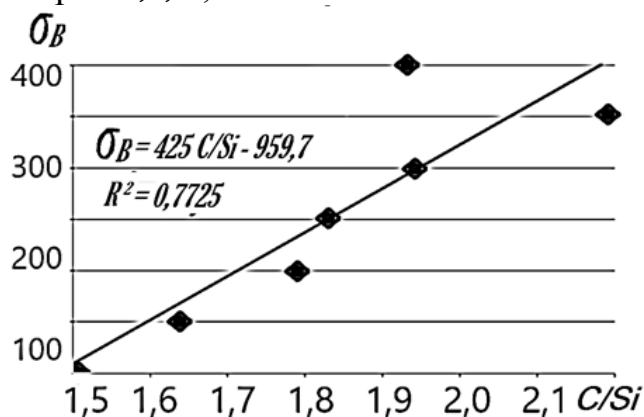


Рис. 7. Залежність міцності  $\sigma_B$ , Н/мм<sup>2</sup> сірого чавуну з пластинчастим графітом від відношення  $C/Si$  вмісту вуглецю до вмісту кремнію у його хімічному складі

Результатами виконаних досліджень встановлено, що величини вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності, раціонально визначати за формулами, апробованими методом Монте-Карло, використовуючи ймовірнісний підхід при врахуванні вмісту кожного елемента у сплаві. Наведені в таблицях і на рисунках дані щодо розподілів величин вуглецевого еквівалента і ступеня евтектичності хімічного складу чавуну з пластинчастим графітом надають інформацію, необхідну для вибору марки чавуну для ливарних виробів.

Розроблені нові рішення і формули уточнюють аналогічні 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.

У третьому розділі представлено результати дослідження залежності механічних властивостей сірого чавуну промислових партій від вуглецевого еквівалента  $C_{екв}$ , ступеня евтектичності  $S_{евт}$ , відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію  $C/Si$  у його хімічному складі. Результати розрахунків ступеня евтектичності за формулами, запропонованими в літературних джерелах, дещо різняться, але, як і формули для розрахунку  $C_{екв}$ , однаково відображають вплив  $C$ ,  $Si$ ,  $Mn$ ,  $P$ ,  $S$ , інших хімічних елементів у складі чавуну на ці показники. На прикладі дослідження ливарних виробів для залізничного транспорту

промислових партій-плавов встановлено вплив корекції первинних заводських даних на розподіли величин вмісту хімічних елементів у складі сірого чавуну. Величину вуглецевого еквівалента  $C_{\text{екв}}$  хімічного складу чавуну розраховували за формулою  $C_{\text{екв}} = C + 0,3 Si + 0,33 P - 0,03 Mn + 0,40 S$ , де  $C, Si, Mn, P, S$  – вміст цих елементів, %. Кількість досліджених партій-плавов гальмівних колодок для рухомого складу залізниці, вироблених на ливарному заводі ТОВ «М-ЛИТ», складала 105, «клину Ханіна» – 107.

Встановлено, що видалення грубих помилок з масивів даних не впливає на їх загальні показники. Фактичні діапазони розподілу хімічних елементів у чавуні, з якого виготовлені ливарні вироби відповідно до ГОСТ 30249-97, а саме діапазони вмісту  $C, Si, Mn$  помітно вужчі, порівняно з первинними заводськими даними. Діапазон вмісту  $C$  зменшився, %, з (2,76...3,04) до (2,85...2,96), тобто з 0,28 до 0,11; діапазон  $Si$  – з 0,16 до 0,06;  $Mn$  – з 0,28 до 0,20. Показники вмісту фосфору і сірки залишалися незмінними. Коефіцієнти варіації вмісту  $C, Si, Mn, P, S$  у сірому синтетичному чавуні зазначених ливарних виробів не перевищували 0,21, твердості НВ і міцності гальмових колодок на злам – на рівні 0,084 і 0,124, що свідчить про стабільність їх якості. Аналогічні результати отримано й відносно вмісту хімічних елементів у ливарних виробах з чавуну, виплавленого згідно з вимогами ГОСТ 34503-2018. Так, діапазон вмісту вуглецю скоротився від, % (2,75...3,06) до (2,89...3,01), тобто на 0,19.

У третьому розділі представлено також розроблені методику, алгоритм і комп'ютерну програму, що дозволяють враховувати нестабільність хімічного складу матеріалів, які використовують при формуванні шихти та регулюванні хімічного складу розплаву чавуну під час плавки.

За висновками аналізу літературних джерел, який був представлений у дисертації, для уточнення розрахунків шихти у першому наближенні за масу добавки  $\Delta q_M$  матеріалу, що має вноситися в розплав для коригування вмісту конкретного хімічного елемента, що розраховують за формулою (1), було вирішено приймати середні значення  $\bar{E}_M$  та  $\bar{Y}_\Gamma$  цих випадкових змінних з діапазонів їх можливих коливань. В результаті отримуємо орієнтовне (нульове) значення серед можливих значень  $\Delta q_{Mi}$ , де  $i$  – номер варіанта розрахунку ( $i = 1 \dots N$ ;  $N$  – кількість циклів розрахунків за змінною  $i$ ). Далі розраховують діапазон  $E_{q_{\min}} \dots E_{q_{\max}}$  величин вмісту хімічного елемента за умови, що орієнтовне (нульове) значення  $\Delta q_{M \ i=1} = \text{Const}$ . Величини  $q$  та  $E_3$  також залишаються незмінними. При цьому поле розподілу величин  $E_{qi}$  розраховують методом Монте-Карло при використанні ймовірних значень  $E_M$  та  $Y_\Gamma$ , випадково обраних з їх розподілів. Для реалізації такого підходу організовано цикл обчислень за змінною  $j$ , де  $j = 1 \dots K$ . При цьому формулі (1) надають вигляду:

$$E_{qi,j} = \frac{\Delta q_{Mi} \cdot E_{M \ i,j} (100 - Y_{\Gamma \ i,j})}{100q} + E_3. \quad (2)$$

Результати розрахунків  $E_{qi,j}$  за формулою (2) при  $i = 1 \dots N$  у внутрішньому циклі та  $j = 1 \dots K$  в зовнішньому циклі визначають параметри розподілу (середнє значення  $\bar{E}_{qi,j}$ , середнє квадратичне відхилення  $\sigma E_{qi,j}$ , розмах варіювання цієї

величини від  $E_{q_{i,j}min} = \bar{E}_{q_{i,j}} - 3\sigma E_{q_{i,j}}$  до  $E_{q_{i,j}max} = \bar{E}_{q_{i,j}} + 3\sigma E_{q_{i,j}}$ ). Середнє  $\bar{E}_{q_{i,j}}$ , мінімальне  $E_{q_{i,j}}$  та максимальне  $E_{q_{i,j}max}$  значення, які розраховані у першому наближенні, але з урахуванням мінливості випадкових величин  $E_M$  та  $U_G$  у ймовірнісному аспекті, порівнюють з регламентованим стандартом діапазоном величини вмісту в чавуні елемента, а також з початковими значеннями цих величин, розрахованих без урахування непостійності величин  $E_M$  та  $U_G$ . Після оцінки відхилення мінімальної та максимальної величин  $E_{q_{i,j}}$  від зазначених у стандарті приймається рішення щодо необхідності зміщення точки прицілювання величини  $E_q$  у формулі (1) ліворуч або праворуч, залежно від поставленої мети. В разі зміщення точки прицілювання повторюється цикл розрахунків  $\Delta q_M$  за змінною  $j$ . Цикли розрахунків за  $i$  та  $j$  повторюються до визначення із заданою точністю величини  $\Delta q_{Mi,j}$ .

Розроблений алгоритм передбачає можливість застосування «коефіцієнтів вагомості» кожного елемента у складі чавуну в розумінні його важливості для забезпечення необхідного рівня показників якості готових ливарних виробів при скороченні процедури розрахунків  $\Delta q_M$ . Рекомендовано при визначенні «коефіцієнтів вагомості» хімічних елементів у чавуні орієнтуватися на один чи декілька з наступних пріоритетів: складність забезпечення вимог стандарту щодо вмісту у чавуні конкретного хімічного елемента; суттєвість впливу елемента в чавуні на його структуру, властивості, експлуатаційні характеристики ливарних виробів з чавуну; техніко-економічні показники, зокрема, вартість матеріалів (феросплавів тощо), які використовують для забезпечення заданого вмісту елемента в чавуні. З урахуванням ступеня вагомості кожного елемента запропоновано критерій оцінки результату корекції хімічного складу чавуну у вигляді середньозваженої похибки визначеного вмісту хімічних елементів відносно заданих точок прицілювання. Зазначений критерій має вигляд:

$$K_{OPT} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^{m=M} |\varepsilon_m|, \text{ при обмеженні } |\varepsilon_m| \leq [\varepsilon_m],$$

де  $K_{OPT}$  – критерій оцінки процесу корекції вмісту хімічних елементів у чавуні або у складі шихти;  $\Delta E_{i_m}$  – відхилення вмісту  $E_{i_m}$   $m$ -того елемента від «точки прицілювання»  $E_{q_m}$ , яким є бажаний вміст  $m$ -того елемента в чавуні,  $\Delta E_{i_m} = |E_{q_m} - E_{i_m}|$ ;  $\varepsilon_m$  – похибка розрахунку,  $\varepsilon_m = \frac{\Delta E_{i_m}}{E_{q_m}}$ ;  $[\varepsilon_m]$  – гранично допустиме значення похибки розрахунку  $m$ -того елемента;  $m$  – номер хімічного елемента, вміст якого у чавуні коригується,  $m = 1...M$ ;  $M$  – кількість елементів, що розглядається. Розраховане значення критерію  $K_{OPT}$  визначається величиною  $\varepsilon_m$ ,  $K_{OPT} \rightarrow \min$  при  $\sum_{n=1}^{m=M} |\varepsilon_m| \rightarrow \min$ .

Розрахунки завершуються, коли величини критерію  $K_{OPT}$  вже не змінюються при наступному циклі.

Врахування в ймовірнісному аспекті нестабільності хімічного складу компонентів шихти для виплавлення чавуну представляє собою значно складнішу задачу, ніж моделювання процедури регулювання хімічного складу розплаву чавуну за результатами контролю вмісту елементів у відібраний з розплаву пробі. В розрахунках маси компонентів у складі шихти застосовано ті



ж самі алгоритм та формули (1) і (2), але без змінної  $E_3$ . Процедура визначення маси компонентів шихти передбачає ймовірнісну оцінку із застосуванням методу Монте-Карло впливу нестабільності хімічного складу матеріалу компонентів шихти на хімічний склад чавуну. На першому етапі розрахунків величину  $\Delta q_M$  маси компоненту шихти, вибрану за точку прицілювання, як і величини  $q$  та  $U_G$ , вважають константами. Далі розрахунки проводяться за викладеною вище схемою.

Викладений алгоритм передбачає можливість уточнення і автоматично, і вручну характеристик матеріалів шихти, точок прицілювання, коефіцієнтів вагомості тощо. Також передбачена можливість прогнозувати і враховувати величину угару  $U_G$ , як функцію параметрів процесу плавлення чавуну (температури розплаву, тривалості плавки тощо). Усі розрахунки виконуються протягом декількох секунд.

Перевага запропонованого підходу перед іншими методиками полягає у можливості на будь-якій стадії моделювання 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.

У четвертому розділі представлені результати досліджень адаптивного методу термічного деривативного експрес-аналізу (ТДА) властивостей розплавів чавуну на основі розпізнавання форми кривих його охолодження (РФКО). Розроблено новий критерій порівняння кривої охолодження (РКО) та термічної кривої охолодження (ТКО), рис. 8. Також удосконалено конструкцію теплоізованого сталевого пробовідбірника занурення із термopарним пакетом і колінчастий зонд для занурення пробовідбірника в розплавлений метал при проведенні ТДА, рис. 9, який був застосований для відбору проб рідкого металу з лабораторної печі (2,5 кг), індукційної середньочастотної печі (160 кг) та транспортно-заливального ківша у промислових умовах (60 кг).

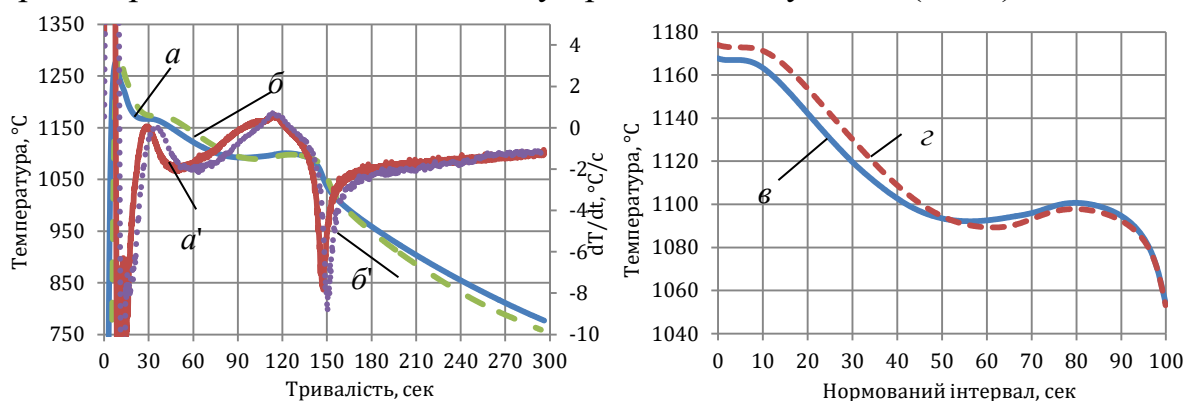


Рис. 8 Криві охолодження зразків чавуну та їх перші похідні: крива охолодження зразка (ТКО) та її перша похідна—  $a$  та  $a'$ ; крива охолодження (РКО) та її перша похідна—  $b$  та  $b'$ ; нормовані криві охолодження ТКО —  $v$  та РКО —  $z$ .



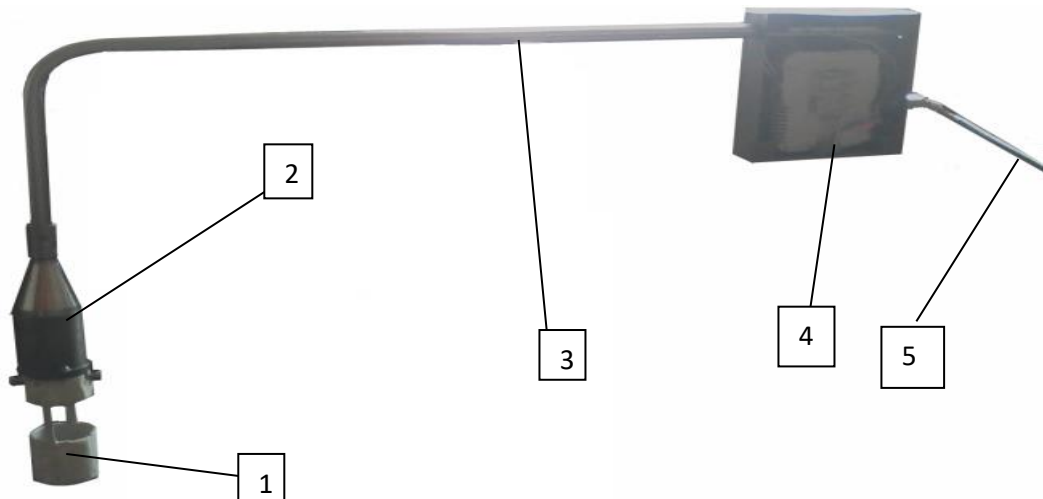


Рис. 9 Колінчастий зонд з АЦП та теплоізовльованим занурювальним сталевим пробовідбірником з терморпарою та термороз'ємом: 1 – сталевий стаканчик-пробовідбірник занурення; 2 – корпус із термороз'ємом; 3 – подовжуюча трубка; 4 – захисний корпус для АЦП; 5 – подовжуючий екранований кабель USB.

На рівні винаходів розроблено нові способи термічного аналізу розплаву чавуну, які завдяки удосконаленню критерію  $\bar{Z}$  розпізнавання форми кривих охолодження забезпечують мінімізацію розкиду його значень у межах двостороннього довірчого інтервалу. Розрахункова формула критерію  $\bar{Z}$  має вигляд:

$$\bar{Z} = \sum_{i=1}^{1=n} |(T_{1i} - T_{2i})|/n \pm t_{\alpha}(n) \cdot \sigma/\sqrt{n}, \quad (3)$$

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

Розроблено новий спосіб ТДА, який враховує нерівнозначність впливу різних температурних діапазонів охолодження рідкого чавуну на його властивості шляхом введення в формулу (3) коефіцієнта впливу  $K_i$ . В результаті ця формула приймає вигляд:

$$\bar{Z}_u = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{1=n} |K_i(T_{1i} - T_{2i})| \pm t_{\alpha}(n) \cdot \sigma/\sqrt{n}, \quad (4)$$

де  $\bar{Z}_u$  – уточнений критерій  $\bar{Z}_u$ ;  $K_i$  – коефіцієнт впливу  $i$ -того температурного інтервалу при охолодженні рідкого металу на його властивості (температури  $T_i$  в одній чи декількох точках  $i$  на кривій ТКО).

Значення коефіцієнта  $K_i$  для кожного температурного інтервалу на вісі за часом ТКО визначають теоретично чи за результатами попередньо виконаних експериментів.

Спосіб ТДА, заснований на використанні формули (3), спрощує виключення з аналізу будь-якого температурного інтервалу кристалізації чавуну у разі потреби. Зокрема ділянки ТКО, яка характеризує первинну кристалізацію. Для цього величина коефіцієнта  $K_i$  в точках  $i$  цього інтервалу прирівнюється нулю. Як варіант реалізації розробленого способу ТДА, запропоновано величину коефіцієнта  $K_i$  визначати в функції латентної (прихованої) теплоти кристалізації чавуну. Розроблені науково-технічні рішення в напрямі розвитку ТДА суттєво посилюють можливості цього методу щодо прогнозу властивостей чавунних

виливків.

При порівнянні наведених на рис.8 ТКО та РКО критерій  $\bar{Z}=3,53$ . При цьому враховувався весь інтервал кристалізації. Тому  $K_i=1$ .

Таблиця 3 – Об’ємні частки складових мікроструктури чавуну у зразках

| Зразок № | Складові мікроструктури, % |        |        |       |
|----------|----------------------------|--------|--------|-------|
|          | Ледебурит                  | Графіт | Перліт | Ферит |
| а (РКО)  | 25                         | 13     | 62     | 0     |
| б (ТКО)  | 28                         | 19     | 53     | 0     |

Дослідно встановлено, що при  $\bar{Z} \leq 6$  зразки відібраних проб розплаву подібні за мікроструктурою та властивостями. Тому розроблений метод верифіковано та зазначено, що даний підхід дає можливість прогнозувати хімічний та структурний склад, а також властивості майбутнього вилівка ще на етапі розплаву та оперативно його скорегувати у разі необхідності.

## ВИСНОВКИ

1. 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.

2. Запропоновано і реалізовано з використанням комп’ютерного моделювання із застосуванням методу Монте-Карло методики, яка враховує ймовірнісний характер вуглецевого еквівалента, ступеня евтектичності, відношення вмісту вуглецю до вмісту кремнію в хімічному складі сірого синтетичного чавуну при розрахунках властивостей виливків з нього.

3. З позицій ймовірнісного підходу встановлено наявність кореляційних зав’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.

4. Розроблено емпіричні формули, що відображають у ймовірнісному підході залежності міцності і твердості виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом від ймовірних величин показників  $S_{екв}$ ,  $S_{евт}$ ,  $C/Si$  його хімічного складу. Показано перспективність використання на практиці запропонованого підходу і розроблених формул для прогнозу твердості та міцності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом за даними його хімічного складу.

5. За результатами аналізу масивів показників якості промислових партій-плавов чавунних гальмівних колодок та «клину Ханіна» для залізничного

транспорту (~ 200 партій-плавов), 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 відповідні бази даних. Показано, що у відносно вузьких діапазонах змін вуглецевого еквівалента чавуну ( $C_{екв} = 3,3...3,6$  % згідно ГОСТ 30249-97 та  $C_{екв} = 3,08...3,5$  % згідно 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  $C_{екв}$ .

6. За результатами 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 %.

7. 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.

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

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

***Статті у виданнях категорії A 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. URL: <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0001046421>

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. **Сиренко 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. **Сиренко 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., **Сиренко 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. **Сиренко 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-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 термічного аналізу рідкого чавуну / Е.В. Захарченко, **К.А. Сиренко**, О.Л. Гончаров, О.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. 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 «ТермоЕхр» / 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., **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. **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.

## 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 за спеціальності 05.16.04 – Ливарне виробництво. Фізико-технологічний інститут металів та сплавів НАН України. Київ, 2024.

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну задачу, а саме розвинуто методологію контролю і регулювання хімічного складу і властивостей сірого синтетичного чавуну в процесі його плавки в індукційних тигельних печах. Розроблено методику та алгоритм моделювання процедури визначення маси компонентів шихти для виплавлення чавуну і коригування хімічного складу його розплаву безпосередньо під час плавки. Запропоновано і реалізовано підхід, що дозволяє враховувати в ймовірнісному аспекті із застосуванням методу Монте-Карло нестабільність вмісту хімічних елементів у модифікаторах, які використовують для корекції складу чавуну. Досліджено хімічний склад і параметри розподілу *C*, *Si*, *Mn*, *P*, *S*, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності та механічні властивості сірого чавуну промислових партій-плавок ливарної продукції, виготовленої згідно з вимогами ГОСТ 30249-97 та ГОСТ 34503-2018. Сформовано відповідні бази даних.

З позицій ймовірнісного підходу виявлені кореляційні зв'язки і встановлені 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. Розроблено формули, що відображають у ймовірнісному підході залежності міцності і твердості виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом від ймовірних величин зазначених показників його хімічного складу. Показано перспективність використання на практиці запропонованого ймовірнісного підходу і розроблених формул для прогнозу твердості та міцності виливків із сірого чавуну з пластинчастим графітом за узагальненими показниками його хімічного складу.

На основі результатів виконаних досліджень і ґрунтового аналізу виробничого досвіду ливарних підприємств обґрунтовано доцільність внесення доповнень і уточнень вимог до хімічного складу сірого синтетичного чавуну, регламентованих у стандартах і технічних умовах на ливарну продукцію.

Регламентовано зменшити вміст сірки у хімічному складі сірого синтетичного чавуну, що виплавляють в індукційних печах до рівня не більше 0,05 %.

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.

**Ключові слова:** ливарне виробництво, чавун, хімічний склад, вуглецевий еквівалент, ступінь евтектичності, властивості, шихта, розплав, коригування, ймовірнісний підхід, термічний деривативний 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 the rights of a manuscript.**

The dissertation on competition of a scientific degree of the candidate of technical sciences on a specialty 05.16.04 – Foundry manufacture. Physical and Technological Institute of Metals and Alloys of the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2024.

The thesis solves an urgent scientific and applied problem, namely, the development of a methodology for controlling and regulating the chemical composition and properties of grey synthetic cast iron during its melting in induction crucible furnaces. A methodology and algorithm for modelling the procedure for determining the mass of the components of the charge for iron smelting and adjusting the chemical composition of its melt directly during melting have been developed. An approach has been proposed and implemented that allows taking into account the instability of the content of chemical elements in modifiers used to correct the composition of cast iron in a probabilistic manner using the Monte Carlo method. The chemical composition and distribution parameters of C, Si, Mn, P, S, carbon equivalent, degree of eutecticity, and mechanical properties of grey cast iron of industrial batches of foundry products manufactured in accordance with the requirements of GOST 30249-97 and GOST 34503-2018 were investigated. Relevant databases were created.

Using a probabilistic approach, correlations were found and correlation coefficients were established between the carbon equivalent, eutecticity, and the ratio of carbon to silicon content in the chemical composition of grey cast iron with lamellar graphite and the mechanical properties of castings. The formulas reflecting the dependence of strength and hardness of castings from grey cast iron with lamellar graphite on the probable values of the specified indicators of its chemical composition in a probabilistic approach have been developed. The article shows the prospects of using in practice the proposed probabilistic approach and developed formulas for



predicting the hardness and strength of castings from grey cast iron with lamellar graphite by generalised indicators of its chemical composition.

Based on the results of the research and a thorough analysis of the production experience of foundries, the article substantiates the expediency of introducing additions and clarifications to the requirements for the chemical composition of grey synthetic cast iron regulated in the standards and specifications for foundry products. It is regulated to reduce the sulphur content in the chemical composition of grey synthetic cast iron smelted in induction furnaces to a level not exceeding 0,05 %.

The methodology of thermal derivative analysis (TDA) of liquid cast iron in the casting process was developed by improving the method of determining the shape of the melt's thermal cooling curves (TCC) and comparing them with the reference cooling curves (RC). The novelty of the developed methods for thermal analysis of liquid cast iron is protected by patents of Ukraine for invention (No. 113333) and utility model No. 99968 and copyright certificate No. 17697. New design immersion samplers have been developed and put into practice, which ensure the stability of liquid metal sampling conditions.

**Keywords:** foundry, cast iron, chemical composition, carbon equivalent, degree of eutecticity, properties, charge, melt, adjustment, probabilistic approach, thermal derivative analysis.