

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Барсук Андрій Сергійович

УДК 621.74

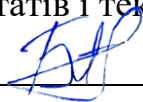
ДИСЕРТАЦІЯ
ПРОЄКТНО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПІДХІД В РОЗРОБЦІ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ
ЧАВУНУ ДЛЯ ВИЛИВКІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ
АБРАЗИВНОГО ТЕРТЯ

Спеціальність: 136 – Металургія

Галузь знань: 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

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


_____ **А.С. Барсук**

підпис

Ініціали та прізвище дисертанта

Науковий керівник

Дьомін Дмитро Олександрович

доктор технічних наук, професор

Харків – 2026

Анотація

Барсук А. С. Проектно-експериментальний підхід в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 136 – Металургія. – Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі, пов'язаної з розробкою проектно-експериментального підходу стосовно технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя.

Об'єкт дослідження – чавун для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя.

Предмет дослідження – оптимальний склад чавуну та легуючі комплекси, що забезпечують максимальні значення коефіцієнту зносостійкості, твердості, межі міцності на розрив, ударної в'язкості.

Метою дисертаційної роботи є розробка проектно-експериментального підходу в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя, на основі синтезу оптимальних хімічних складів чавуну та подальшої практичної реалізації відповідних технологічних рішень.

У *вступі* обґрунтовано актуальність проблеми, пов'язаної з тим, що вимоги до сплавів, які використовуються в машинобудуванні, диктуються експлуатаційними умовами застосування деталей, виготовлених з таких сплавів і серед виливків для машинобудування можна виділити окремо такі, які працюють в умовах інтенсивного тертя, зокрема абразивного тертя. Прикладами таких виливків є лопатки змішувачів різного функціонального

призначення, які швидко зношуються, що потребує досліджень, спрямованих а підвищення зносостійкості чавуну для таких виливків.

У *першому розділі* досліджено актуальні науково-технічні завдання, пов'язані з загальними підходами та напрямками пошуку рішень щодо заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя.

У *другому розділі* визначено закономірності впливу хімічного складу зносостійкого чавуну на межу міцності та коефіцієнт зносостійкості шляхом розробка математичних моделей «склад-властивості» для межі міцності та коефіцієнту зносостійкості, та визначенням напрямів практичного використання моделей для межі міцності чавуну та коефіцієнту зносостійкості в рамках проєктно-експериментального підходу. Проведено якісний аналіз синтезованого чавуну по коефіцієнту зносостійкості.

У *третьому розділі* визначені напрямки легування зносостійкого чавуну шляхом виявлення впливу на твердість зносостійкого чавуну процесу легування титаном та виявлення впливу комплексного легування зносостійкого чавуну титаном на бором на ударну в'язкість. Визначено вплив ванадію на твердість комплексного Cr-Ni-Ti-Cu чавуну. Показано, що визначивши кількісно вплив обраних варіантів легування на показники зносостійкого чавуну, можна оптимізувати хімічний склад, цілеспрямовано регулюючи властивості чавуну, насамперед твердості, як основної властивості, що формує зносостійкість.

У *четвертому розділі* вирішена задача оптимізації хімічного складу зносостійкого чавуну, для чого обрано та обґрунтовано математичний апарат, яким можуть бути виявлені найкращі варіанти хімічного складу з точки зору впливу на показники зносостійкого чавуну. Показано, що для оптимізації хімічного складу зносостійкого чавуну варто використовувати два методи: канонічне перетворення поверхні відгуку та гребеневий аналіз, тому що вони дозволяють аналізувати поверхню відгуку на предмет поведінки вихідних змінних при русі від центру плану експерименту. При цьому можуть бути

визначені екстремуми функції, що описує вихідну змінну, а також локальні оптимуми з урахуванням обмежень, що накладаються на вхідні змінні. Такими обмеженнями можуть бути межі області варіювання вхідних змінних. Використанням таких методів виконана оптимізація складу зносостійкого чавуну за критеріями твердості та коефіцієнту зносостійкості, а також за критеріями межі міцності та ударної в'язкості.

У *п'ятому розділі* виконано розробку технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя. Для цього запропоновані напрямки вибору раціональних легуючих комплексів, що базується на визначенні якісного впливу кожного легуючого елементу на властивості чавуну, якими обрано твердість (HRC), коефіцієнт зносостійкості (K_{wr}), межа міцності на розтяг (σ_b), ударна в'язкість (a_n). Описано технологію виплавки комплексно легованого зносостійкого чавуну для лопаток асфальтозмішувачів та представлено результати визначення хімічного складу, мікроструктури та твердості борохромонікелеванадієвого чавуну. Показано, що комплексне легування, що базується на поєднанні графітизуючих та карбідоутворюючих елементів в складі борохромонікелеванадієвого чавуну для виготовлення лопаток асфальтозмішувачів забезпечує можливість отримання чавуну з твердістю в межах $HRC49-HRC51$.

У *висновках* наведено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених наукових задач дослідження.

За результатами дослідження отримано такі наукові результати:

- Вперше побудовано математичну модель $\sigma_b=f_1(C; C_{eq}; Ti)$, що дозволяє визначити поведінку межі міцності на розтягування чавуну при зміні вмісту вуглецю та вуглецевого еквіваленту чавуну за різного легування його титаном та оптимізовано хімічний склад чавуну за критерієм максимізації межі міцності на розтягування.

- Вперше побудовано математичну модель $K_{wr}=f_2(C; C_{eq}; Ti)$, що дозволяє визначити поведінку коефіцієнту зносостійкості чавуну при зміні

вмісту вуглецю та вуглецевого еквіваленту чавуну за різного легування його титаном та оптимізовано хімічний склад чавуну за критерієм максимізації коефіцієнту зносостійкості.

- Вперше побудовано математичну модель $HRC=f(C; C_{eq}; Ti)$, що дозволяє визначити поведінку твердості чавуну при зміні вмісту вуглецю та вуглецевого еквіваленту чавуну за різного легування його титаном та оптимізовано хімічний склад чавуну за критерієм максимізації твердості.

- Вперше побудовано математичну модель $a_n=f(C; C_{eq}; Ti)$, що дозволяє визначити поведінку ударної в'язкості чавуну при зміні вмісту вуглецю та вуглецевого еквіваленту чавуну за різного легування його титаном та оптимізовано хімічний склад чавуну за критерієм максимізації ударної в'язкості, а також визначено особливості впливу на ударну в'язкість суміщеного легування чавуну титаном та бором.

- Знайшли подальший розвиток напрямки вибору раціональних легуючих комплексів з урахуванням різного впливу легуючих елементів на властивості зносостійкого чавуну.

- Знайшли подальший розвиток технологія виготовлення комплексно легованого чавуну для лопаток асфальтозмішувачів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в наступному:

- надано практичні рекомендації для конструкторів по підборі хімічному складу чавуну, який має забезпечувати вимоги по межі міцності на розрив, та для технологів по раціональному складу шити та підбору таких режимів легування чавуну титаном за обраного технологіями хімічного складу чавуну, які забезпечують максимум межі міцності чавуну;

- надано практичні рекомендації по забезпеченню високих значень зносостійкості чавуну для виготовлення деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного тертя, завдяки оптимізації хімічного складу чавуну по критерію максимуму коефіцієнта зносостійкості, з можливістю варіативного вибору раціонального режиму коригування вмісту кремнію та марганцю шляхом введення феросиліцію та феромарганця;

– надано методику вибору раціональних варіантів підвищення твердості чавуну для деталей типу «лопатки змішувачів», поверхні яких піддаються інтенсивному тертю з боку абразивних елементів, шляхом комбінованого легування чавуну титаном та введення феросплавів, що впливають як на процес графітизації, так і на процес карбідоутворення;

– надано методику вибору хімічного складу зносостійкого чавуну для деталей, що працюють в умовах абразивного тертя, який може бути використаний для розрахунку та оптимізації шихти за критеріями витрат на шихтові матеріали та одночасного забезпечення комплексу вимог по механічним властивостям чавуну – або твердості, або межі міцності на розрив, коефіцієнту зносостійкості та ударної в'язкості;

– надані практичні рекомендації по легуванню чавуну бором, хромом, нікелем, ванадієм, виконання яких забезпечує підвищення твердості чавуну та зносостійкості і, відповідно, експлуатаційного ресурсу лопаток асфальтозмішувачів;

– отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути впроваджені в ливарних цехах машинобудівних підприємств.

За результатами дослідження підтверджено практичну та теоретичну цінність розробленого проєктно-експериментального підходу в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя, надано практичні рекомендації щодо вибору легуючих елементів, відповідно необхідного вмісту вуглецю та вуглецевого еквіваленту задля отримання зносостійкого чавуну для лопаток змішувачів, які працюють за умов абразивного тертя, а також розглянуто перспективи подальшого розвитку дослідження.

Ключові слова: зносостійкість чавуну, абразивне тертя, легування, легуючі елементи, вуглецевий еквівалент, механічні властивості, твердість, коефіцієнт зносостійкості, ударна в'язкість, лопатки змішувачів, індукційна плавка, мікроструктура, лиття, структурні та фазові характеристики, фазовий склад, хімічний склад, зносостійка структура, карбіди титану, стійкість

деталей, що працюють в умовах абразивного зношування, зносостійкі покриття, поверхневе зміцнення.

ABSTRACT

Barsuk A. S. Design-experimental approach in the development of technological measures to increase the wear resistance of cast iron for castings operating under abrasive friction conditions. Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 136 – Metallurgy. – National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”, Kharkiv, 2026.

The dissertation is devoted to solving a topical scientific and technical problem related to the development of a design-experimental approach to technological measures to increase the wear resistance of cast iron for castings operating under abrasive friction conditions

The object of the study is cast iron for castings operating under abrasive friction conditions.

The subject of the study the optimal composition of cast iron and alloying elements that ensure maximum values for wear resistance, hardness, tensile strength, and impact toughness.

The aim of the dissertation is to develop a design-experimental approach in the development of technological measures to increase the wear resistance of cast iron for castings operating under abrasive friction conditions, based on the synthesis of optimal chemical compositions of cast iron and the subsequent practical implementation of relevant technological solutions.

The introduction substantiates the relevance of the problem, which is related to the fact that the requirements for alloys used in mechanical engineering are dictated by the operating conditions of parts made of such alloys, and among castings for mechanical engineering, one can distinguish those that operate under

conditions of intense friction, in particular abrasive friction. Examples of such castings are mixer blades of various functional purposes, which wear out quickly, which requires research aimed at increasing the wear resistance of cast iron for such castings.

The first chapter examines current scientific and technical tasks related to general approaches and directions for finding solutions to measures to increase the wear resistance of cast iron for castings operating under conditions of abrasive friction.

The second chapter determines the patterns of the influence of the chemical composition of wear-resistant cast iron on the tensile strength and wear resistance coefficient by developing mathematical models of "composition-property" for the tensile strength and wear resistance coefficient, and by determining the directions of practical use of models for the tensile strength of cast iron and wear resistance coefficient within the framework of the design-experimental approach. A qualitative analysis of the synthesized cast iron by the wear resistance coefficient was carried out.

The third chapter determines the directions of alloying wear-resistant cast iron by identifying the influence of the titanium alloying process on the hardness of wear-resistant cast iron and identifying the influence of complex alloying of wear-resistant cast iron with titanium and boron on impact toughness. The influence of vanadium on the hardness of complex Cr-Ni-Ti-Cu cast iron is determined. It is shown that by quantitatively determining the influence of selected alloying options on the performance of wear-resistant cast iron, it is possible to optimize the chemical composition, purposefully regulating the properties of cast iron, primarily hardness, as the main property that forms wear resistance.

The fourth chapter solves the problem of optimizing the chemical composition of wear-resistant cast iron, for which a mathematical apparatus is selected and justified, which can identify the best options for the chemical composition from the point of view of the impact on the indicators of wear-resistant cast iron. It is shown that two methods should be used to optimize the

chemical composition of wear-resistant cast iron: canonical transformation of the response surface and comb analysis, because they allow analyzing the response surface for the behavior of the output variables when moving from the center of the experimental plan. In this case, the extrema of the function describing the output variable can be determined, as well as local optima, taking into account the restrictions imposed on the input variables. Such restrictions can be the boundaries of the range of variation of the input variables. Using such methods, the composition of wear-resistant cast iron was optimized according to the criteria of hardness and wear resistance coefficient, as well as the criteria of ultimate strength and impact toughness.

The fifth chapter developed the technological measures to increase the wear resistance of cast iron for castings operating under abrasive friction conditions. For this purpose, directions for choosing rational alloying complexes are proposed, which is based on determining the qualitative influence of each alloying element on the properties of cast iron, which are selected for hardness (HRC), wear resistance coefficient (K_{wr}), tensile strength (σ_b), impact toughness (a_n). The technology for melting complexly alloyed wear-resistant cast iron for asphalt mixer blades is described and the results of determining the chemical composition, microstructure and hardness of boron chromium nickel vanadium cast iron are presented. It is shown that complex alloying, based on a combination of graphitizing and carbide-forming elements in the composition of boron chromium nickel vanadium cast iron for the manufacture of asphalt mixer blades, provides the possibility of obtaining cast iron with a hardness within HRC49–HRC51.

The conclusions present the main results of scientific work on solving the scientific problems of the study.

The following scientific results were obtained as a result of the study:

For the first time, a mathematical model $\sigma_b = f_1(C; C_{eq}; Ti)$ has been constructed, which allows determining the behavior of the tensile strength of cast iron when changing the carbon content and carbon equivalent of cast iron with

different alloying with titanium, and the chemical composition of cast iron was optimized according to the criterion of maximizing the tensile strength.

For the first time, a mathematical model $K_{wr}=f_2(C; C_{eq}; Ti)$ has been constructed, which allows determining the behavior of the wear resistance coefficient of cast iron when changing the carbon content and carbon equivalent of cast iron with different alloying with titanium, and the chemical composition of cast iron was optimized according to the criterion of maximizing the wear resistance coefficient.

For the first time, a mathematical model $HRC=f(C; C_{eq}; Ti)$ has been constructed, which allows determining the behavior of the hardness of cast iron when changing the carbon content and carbon equivalent of cast iron with different alloying with titanium, and the chemical composition of cast iron was optimized according to the criterion of maximizing hardness.

For the first time, a mathematical model $a_n=f(C; C_{eq}; Ti)$ has been developed, which allows determining the behavior of cast iron's impact toughness as the carbon content and carbon equivalent of the cast iron vary under different titanium alloying conditions, and the chemical composition of the cast iron has been optimized to maximize impact toughness, and the specific effects of combined titanium and boron alloying on the impact toughness of cast iron have been determined

Further research has been conducted on the selection of optimal alloying systems, taking into account the varying effects of alloying elements on the properties of wear-resistant cast iron.

The technology for producing complex-alloyed cast iron for asphalt mixer blades has been further developed.

The practical significance of the results obtained is as follows:

- Practical recommendations are provided for designers on selecting the chemical composition of cast iron to meet tensile strength requirements, and for process engineers on the optimal composition of the charge and the selection of

titanium alloying conditions for the cast iron composition chosen by the process engineers, which ensure maximum tensile strength of the cast iron;

- practical recommendations are provided for ensuring high wear resistance in cast iron used to manufacture components operating under conditions of intense abrasive friction, achieved by optimizing the chemical composition of the cast iron to maximize the wear resistance coefficient, with the possibility of flexibly selecting an optimal adjustment regime for silicon and manganese content by adding ferrosilicon and ferromanganese;

- a methodology is presented for selecting optimal approaches to increasing the hardness of cast iron for components such as “mixer blades,” whose surfaces are subjected to intense friction from abrasive elements, through the combined alloying of cast iron with titanium and the addition of ferroalloys that influence both the graphitization process and the carbide formation process;

- a methodology is provided for selecting the chemical composition of wear-resistant cast iron for components operating under abrasive friction conditions, which can be used to calculate and optimize the charge composition based on the cost of raw materials while simultaneously meeting a set of requirements for the mechanical properties of the cast iron—either hardness or tensile strength, wear resistance coefficient, and impact toughness;

- practical recommendations are provided for alloying cast iron with boron, chromium, nickel, and vanadium; following these recommendations increases the hardness and wear resistance of the cast iron and, consequently, extends the service life of the blades in asphalt mixers;

- the results obtained in this dissertation can be implemented in the foundries of machine-building enterprises.

The results of the study confirmed the practical and theoretical value of the developed design-experimental approach in the development of technological measures to increase the wear resistance of cast iron for castings operating under abrasive friction conditions, practical recommendations were given on the choice of alloying elements, respectively the required carbon content and carbon

equivalent to obtain wear-resistant cast iron for mixer blades operating under abrasive friction conditions, and the prospects for further development of the study were also considered.

Keywords: wear resistance of cast iron, abrasive friction, alloying, alloying elements, carbon equivalent, mechanical properties, hardness, wear resistance coefficient, impact toughness, mixer blades, induction melting, microstructure, casting, structural and phase characteristics, phase composition, chemical composition, wear-resistant structure, titanium carbides, durability of parts operating under abrasive wear conditions, wear-resistant coatings, surface hardening

Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковано наукові результати:

1) Kharchenko, S., Barsuk, A., Karimova, N., Nanka, A., Pelypenko, Y., Shevtsov, V., Morozov, I., Morozov, V. (2021). Mathematical model of the mechanical properties of Ti-alloyed hypoeutectic cast iron for mixer blades. EUREKA: Physics and Engineering, 3, 99–110. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001830> (Scopus)

2) Frolova, L., Barsuk, A., Nikolaiev, D. (2022). Revealing the significance of the influence of vanadium on the mechanical properties of cast iron for castings for machine-building purpose. Technology Audit and Production Reserves, 4 (1 (66)), 6–10. doi: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.263428> (Scopus)

3) Barsuk, A. (2022). Optimization of the composition of cast iron for cast parts operating under abrasive friction, according to the criterion of maximum wear resistance. ScienceRise, 6, 14–20. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002775> (зарубіжне)

4) Barsuk, A. (2024). Development of the hardness mathematical model of Ti-alloyed iron for cast parts used in conditions of intensive abrasive friction. Technology Audit and Production Reserves, 3 (1 (77)), 6–9. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.301156/> (Scopus)

5) Barsuk, A., Makarenko, D., Trenov, M., Sevoian, A. (2024). Identification of regularities of the influence of titanium on the impact toughness of hypoeutectic wear-resistant cast iron and assessment of the efficiency of its additional alloying with boron. ScienceRise, 2, 43–51. <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003629> (зарубіжне)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

Опубліковані праці апробаційного характеру:

1) Барсук А. С., Дьомін Д. О. Підвищення зносостійкості чавунних виливків для роботи в умовах абразивного тертя. XXI Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2023»

2) Барсук А. С. Вплив складу чавуну для литих деталей, що працюють в умовах абразивного тертя, на зносостійкість XIX міжнародна науково-практична конференція «ЛИТВО. Металургія. 2023», 10-12 жовтня 2023 року.

3) Барсук А. С. Визначення твердості ті-легованого чавуну для виливків з підвищеними вимогами до зносостійкості/ XXII Міжнародна науково-практична конференція «ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я. MicroCAD-2024».

4) Барсук А. С. Визначення твердості доевтектичного зносостійкого Ті-легованого чавуну для деталей, що експлуатуються в умовах абразивного тертя. XX Ювілейна міжнародна науково-практична конференція «Литво 2024» XIII Міжнародної науково-практичної конференції металургія 2024, 28 – 30 травня 2024 р.

6) Барсук А. С., Дьомін Д. О. Синтез складу чавуну, легovanого титаном, за критерієм максимуму коефіцієнту зносостійкості. Збірник тез XVII Міжнародної науково-технічної конференції «НЕМЕТАЛЕВІ ВКРАПЛЕННЯ І ГАЗИ У ЛИВАРНИХ СПЛАВАХ», Запоріжжя, 26-27 листопада 2024 року, с. 68–70.

7) Барсук А. С. Закономірності впливу титану на ударну в'язкість доевтектичного зносостійкого чавуну [Електронний ресурс] / А. С. Барсук // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я = Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 33-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. / ред. Є. І. Сокол ; уклад. Г. В. Лісачук ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Електрон. текст. дані. – Харків : НТУ "ХПІ", 2025 – С. 366. URI <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90367>

8) Барсук А. С. Оцінка ефективності додаткового легування доевтектичного зносостійкого чавуну бором [Електронний ресурс] / А. С. Барсук // Литво. Металургія. 2025 = Foundry. Metallurgy. 2025 : матеріали 21-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 27-29 травня 2025 р. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.] ; заг. ред. О. І. Пономаренко. – Електрон. текст. дані. – Харків; Київ, 2025. – С. 29-30. – URI: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90470>

9) Барсук А. С. Систематизовані ретроспективні дані щодо показників ефективності індукційної плавки. XIX Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених» (19–21 листопада 2025 року): матеріали конференції / за ред. проф. Є.І. Сокола. – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – 881, с. 783-784.

https://iiii-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/dmytro_danylchenko_khpi_edu_ua1/ETq1FyBwdhtEv18YLjEYxvsBu5-ALBUC904NsdcbdSwejw?e=FPI8yk

10) Барсук А.С. Хімічний склад та твердість комплексно легованого зносостійкого чавуну за даними промислових плавок. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXIV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2026. Харків: НТУ «ХПІ», (2026), 462. Available at: <https://zenodo.org/records/20205455>

11) Барсук А.С. Визначення можливостей забезпечення комплексних вимог по властивостям зносостійкого чавуну. *Литво. Металургія. 2026: Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції*. Харків: НТУ «ХПІ», 2026. С. 26–27.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ТА НАПРЯМКИ ПОШУКУ РІШЕНЬ ЩОДО ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЧАВУНУ ДЛЯ ВИЛИВКІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ТЕРТЯ (огляд літератури)	12
1.1 Деталі, що працюють в умовах абразивного зносу та погляди на вибір сплавів для таких деталей	12
1.2 Зносостійкі чавуни як сплав для литих деталей, їх властивості та особливості формування структури.....	22
1.3 Математичні методи синтезу та оптимізації сплавів як частини проектно-експериментальний підходів в розробці технологічних заходів.....	31
Висновки до розділу 1	46
РОЗДІЛ 2 ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗНОСОСТІЙКОГО ЧАВУНУ НА МЕЖУ МІЦНОСТІ ТА КОЕФІЦІЄНТ ЗНОСОСТІЙКОСТІ	48
2.1 Розробка математичних моделей «склад-властивості» для межі міцності та коефіцієнту зносостійкості	48
2.2 Напрями практичного використання моделей для межі міцності чавуну та коефіцієнту зносостійкості в рамках проектно- експериментального підходу	57
2.3 Якісний аналіз синтезованого чавуну по коефіцієнту зносостійкості	61
Висновки до розділу 2	70
РОЗДІЛ 3 ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ ЛЕГУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОГО ЧАВУНУ	73
3.1 Визначення впливу на твердість зносостійкого чавуну легування титаном.....	73

3.2 Визначення впливу комплексного легування зносостійкого чавуну титаном на бором на ударну в'язкість	82
3.3 Визначення впливу ванадію на твердість комплексного Cr-Ni-Ti-Cu чавуну	91
Висновки до розділу 3	100
РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗНОСОСТІЙКОГО ЧАВУНУ	103
4.1 Методика оптимізації хімічного складу чавуну	103
4.2 Оптимізація складу зносостійкого чавуну за критеріями твердості та коефіцієнту зносостійкості.....	106
4.3 Оптимізація складу зносостійкого чавуну за критеріями межі міцності та ударної в'язкості	115
Висновки до розділу 4	127
РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЧАВУНУ ДЛЯ ВИЛИВКІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ТЕРТЯ.....	130
5.1 Визначення напрямків вибору раціональних легуючих комплексів.....	130
5.2 Технологія виплавки комплексно легованого зносостійкого чавуну для лопаток асфальтозмішувачів.....	140
5.3 Результати визначення хімічного складу, мікроструктури та твердості борохромонікелеванадієвого чавуну	149
Висновки до розділу 5	166
ВИСНОВКИ.....	169
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	175
ДОДАТОК А.....	191
ДОДАТОК Б	194

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження

Вимоги до сплавів, що використовуються в машинобудуванні, диктуються експлуатаційними умови застосування деталей, виготовлених з таких сплавів. Чавун, як основний матеріал для виливків машинобудування, є складним сплавом, бо має безліч варіантів його хімічного складу. Кожен з таких варіантів забезпечує певні властивості чавуну, причому найбільш доцільним є такий хімічний склад, що забезпечує відразу комплекс властивостей. Відповідно до обраного хімічного складу можлива реалізація та забезпечення різних властивостей чавуну. Важливо зазначати, що усі елементи хімічного складу чавуну умовно можна поділити на дві головні категорії – ті, що сприяють графітизації, та ті, що сприяють карбідоутворенню. Раціональні комбінації таких елементів і є тими факторами, завдяки яким можна регулювати формування мікроструктури та властивостей чавуну. Окрім названих категорій ще треба враховувати наявність шкідливих елементів, до яких відносяться сірка та фосфор. Вміст цих елементів в чавуні має бути мінімізований.

Серед виливків для машинобудування можна виділити окремо такі, які працюють в умовах інтенсивного тертя, зокрема абразивного тертя. Прикладами таких виливків є лопатки змішувачів різного функціонального призначення. Таке особливе виокремлення пояснюється тим, що склад чавуну для таких виливків має бути спеціальним. З одного боку, його мікроструктура має забезпечувати типові вимоги по межі міцності на розтягування чавуну, а з іншого, забезпечувати в структурі наявність карбідів, що сприяють формування високої твердості. Такі виливки не обробляються механічно, бо робочі поверхні не вимагають високої чистоти поверхні.

Зважаючи на те, що визначення раціонального хімічного складу чавуну, до якого надаються вимоги підвищеної стійкості в умовах інтенсивного тертя, базується на рішенні бактофакторної задачі синтезу, необхідно

комплексно підходити до його вибору. Відповідні наукові дослідження мають бути спрямовані на оптимальний синтез чавуну, хімічний склад якого забезпечує вимоги зносостійкості насамперед через забезпечення високих вимог по твердості. Це, своєю чергою, можливе шляхом визначення раціональних легуючих компонентів та відповідних технологічних рішень щодо плавки та легування. З наукової точки зору це передбачає побудову математичних моделей типу «склад – властивості» та їх подальший аналіз, що дало б змогу на практичному рівні визначати необхідну кількість легуючих елементів в складі чавуну. Це дасть змогу розробити та реалізовувати на практиці технологію плавки та позапічної обробки чавуну для виготовлення виливків, що працюють в умовах інтенсивного абразивного тертя.

У зв'язку з вищезазначеним, тема дисертаційної роботи, присвяченої проблемам розробки проєктно-експериментального підходу в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя, є актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі Ливарного НТУ «ХП» в рамках науково-дослідної роботи кафедри та виконання НДДКР за державною темою «Розробка енергоефективних технологій електроплавки металовідходів з неконтрольованою якістю з метою виготовлення чорних сплавів широкої номенклатури для деталей машинобудівного призначення» (Державний реєстраційний номер: 0125U000899).

Мета і завдання дослідження

Метою дисертаційної роботи є розробка проєктно-експериментального підходу в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя, на основі синтезу

оптимальних хімічних складів чавуну та подальшої практичної реалізації відповідних технологічних рішень.

Для досягнення цієї мети поставлені наступні завдання:

- проаналізувати загальні підходи та напрямки пошуку рішень щодо заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя;
- визначити закономірності впливу хімічного складу зносостійкого чавуну на межу міцності та коефіцієнт зносостійкості;
- визначити напрямки легування зносостійкого чавуну;
- провести оптимізацію хімічного складу зносостійкого чавуну;
- розробити технологічні заходи підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя.

Об'єкт дослідження – чавун для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя.

Предмет дослідження – оптимальний склад чавуну та легуючі комплекси, що забезпечують максимальні значення коефіцієнту зносостійкості, твердості, межі міцності на розрив, ударної в'язкості.

Методи дослідження.

Експериментальні промислові дослідження в серійних плавках – для виявлення фактичного хімічного складу, мікроструктури та твердості відповідно до обраних проєктно-технологічних рішень щодо складу та технології плавки чавуну для виливків лопаток асфальтозмувачів; методи планування пасивних експериментів – для побудови рівнянь регресії, що пов'язують хімічний склад чавуну та його властивості: твердість, коефіцієнт зносостійкості, межа міцності на розтягування, ударна в'язкість; метод поверхні відгуку – для візуалізації впливу хімічного складу чавуну на його властивості; методи експериментальної оптимізації – для визначення оптимальних хімічних складів чавуну; методи математичної статистики – для статистичної обробки експериментально-промислових даних та перевірки

гіпотез щодо забезпечення заданих вимог по властивостям зносостійкого комплексно легованого чавуну.

Наукова новизна отриманих результатів:

– Вперше побудовано математичну модель $\sigma_b = f_1(C; C_{eq}; Ti)$, що дозволяє визначити поведінку межі міцості на розтягування чавуну при зміні вмісту вуглецю та вуглецевго еквіваленту чавуну за різного легування його титаном та оптимізовано хімічний склад чавуну за критерієм максимізації межі міцості на розтягування.

– Вперше побудовано математичну модель $K_{wr} = f_2(C; C_{eq}; Ti)$, що дозволяє визначити поведінку коефіцієнту зносостійкості чавуну при зміні вмісту вуглецю та вуглецевго еквіваленту чавуну за різного легування його титаном та оптимізовано хімічний склад чавуну за критерієм максимізації коефіцієнту зносостійкості.

– Вперше побудовано математичну модель $HRC = f(C; C_{eq}; Ti)$, що дозволяє визначити поведінку твердості чавуну при зміні вмісту вуглецю та вуглецевго еквіваленту чавуну за різного легування його титаном та оптимізовано хімічний склад чавуну за критерієм максимізації твердості.

– Вперше побудовано математичну модель $a_n = f(C; C_{eq}; Ti)$, що дозволяє визначити поведінку ударної в'язкості чавуну при зміні вмісту вуглецю та вуглецевого еквіваленту чавуну за різного легування його титаном та оптимізовано хімічний склад чавуну за критерієм максимізації ударної в'язкості, а також визначено особливості впливу на ударну в'язкість суміщеного легування чавуну титаном та бором.

– Знайшли подальший розвиток напрямки вибору раціональних легуючих комплексів з урахуванням різного впливу легуючих елементів на властивості зносостійкого чавуну.

– Знайшли подальший розвиток технологія виготовлення комплексно легованого чавуну для лопаток асфальтозмішувачів.

Практичне значення отриманих результатів:

– надано практичні рекомендації для конструкторів по підборі хімічному складу чавуну, який має забезпечувати вимоги по межі міцності на розрив, та для технологів по раціональному складу шити та підбору таких режимів легування чавуну титаном за обраного технологіями хімічного складу чавуну, які забезпечують максимум межі міцності чавуну;

– надано практичні рекомендації по забезпеченню високих значень зносостійкості чавуну для виготовлення деталей, які працюють в умовах інтенсивного абразивного тертя, завдяки оптимізації хімічного складу чавуну по критерію максимуму коефіцієнта зносостійкості, з можливістю варіативного вибору раціонального режиму коригування вмісту кремнію та марганцю шляхом введення феросиліцію та феромарганця;

– надано методику вибору раціональних варіантів підвищення твердості чавуну для деталей типу «лопатки змішувачів», поверхні яких піддаються інтенсивному тертю з боку абразивних елементів, шляхом комбінованого легування чавуну титаном та введення феросплавів, що впливають як на процес графітизації, так і на процес карбідоутворення;

– надано методику вибору хімічного складу зносостійкого чавуну для деталей, що працюють в умовах абразивного тертя, який може бути використаний для розрахунку та оптимізації шихти за критеріями витрат на шихтові матеріали та одночасного забезпечення комплексу вимог по механічним властивостям чавуну – або твердості, або межі міцності на розрив, коефіцієнту зносостійкості та ударної в'язкості;

– надані практичні рекомендації по легуванню чавуну бором, хромом, нікелем, ванадієм, виконання яких забезпечує підвищення твердості чавуну та зносостійкості і, відповідно, експлуатаційного ресурсу лопаток асфальтозмішувачів;

– отримані в дисертаційній роботі результати можуть бути впроваджені в ливарних цехах машинобудівних підприємств.

Матеріали дисертаційної роботи, в якій розроблено проєктно-експериментальний підхід в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя використовуються в навчальному процесі НТУ «ХПІ» при підготовці студентів спеціальності «Металургія» за освітніми компонентами «Інноваційні основи металургії» та «Автоматизація металургійного виробництва». Це дало можливість забезпечити підвищення рівня як теоретичної, так і практичної підготовки студентів.

Особистий внесок здобувача.

Автором особисто проведено експериментальну та теоретичну частини дослідження, на основі яких виокремлено фундаментальні наукові положення, що виносяться на публічний захист. Результати дисертаційної роботи отримані здобувачем особисто та в співавторстві опубліковані у публікаціях (Додаток А):

1) Видання, які включені до наукометричних баз Scopus:

[1] – здобувачу належить експериментальне дослідження впливу вуглецю, вуглецевого еквіваленту, вмісту титану на межу міцності чавуну та коефіцієнт зносостійкості. Співавторами: Kharchenko S. Karimova N., Nanka A. обґунтування актуальності проблематики експлуатаційної стійкості елементів змішувачів; Pelypenko Y., Shevtsov V., визначення прикладного застосування деталей, що працюють в умовах тертя; Morozov I., Morozov V. проведено літературний пошук за темою дослідження.

[2] – здобувачу належить експериментальне дослідження механічних властивостей чавуну легованого ванадієм, сумісно з модифікуванням. Співавторами: Frolova L. методологія дослідження та статистичний аналіз промислових даних; Nikolaiev D. літературний аналіз та порівняльний аналіз режимів модифікування.

[3] – здобувачу належить аналіз літератури, виявлення проблеми,

побудова математичної моделі та оптимізації для твердості чавуну за даними пасивного експерименту, інтерпретація отриманих результатів.

2) Статті у зарубіжних наукових виданнях:

[4] – здобувачу належить аналіз літератури, виявлення проблеми, верифікація математичної моделі впливу хімічного складу зносостійкого чавуну на коефіцієнт зносостійкості, інтерпретація отриманих результатів.

[5] – здобувачу належить аналіз літератури, виявлення проблеми, побудова математичної моделі для ударної в'язкості за умов різного легування, інтерпретація отриманих результатів. Співавторами: Sevoian A. підбір літературних джерел; Makarenko D. методика обробки даних; Trenov M. оцінка якості математичної моделі.

Дисертація є самостійною роботою здобувача. Всі основні результати дисертації, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто, серед них: математична модель $\sigma_b = f_1(C; C_{eq}; T_i)$; математична модель $K_{wt} = f_2(C; C_{eq}; T_i)$; математична модель $HRC = f(C; C_{eq}; T_i)$; математична модель $a_n = f(C; C_{eq}; T_i)$; результати оптимізації складу чавуну по кожній з отриманих математичних моделей; визначення області допустимих хімічних складів задля забезпечення комплексу вимог по властивостям зносостійкого чавуну; варіант обґрунтування напряму комплексного легування бором, хромом, нікелем, ванадієм чавуну задля забезпечення високих значень твердості чавуну, з якого виготовляються лопатки асфальтозмішувачів.

Автором проаналізовано наукову літературу з даної проблеми, сформульовано завдання дослідження, зроблено висновки. Планування основних напрямків роботи, аналіз, обговорення та узагальнення результатів проведено разом з науковим керівником.

Апробація результатів дисертації.

Основні результати роботи доповідалися на: Міжнародній науково-практичній конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (м. Харків, 2023 – 2025); науковій конференції «ЛИТВО.

МЕТАЛУРГІЯ» (м. Київ-Харків, 2024–2025), Міжнародної науково-технічної конференції «Неметалеві вкраплення і гази у ливарних сплавах» (м. Запоріжжя, 2024), XIX Міжнародної науково-практичної конференції магістрантів та аспірантів (Харків, НТУ «ХП», 2025).

Обсяг і структура дисертації.

Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, 5 розділів, висновків і списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 175 сторінок, включаючи 64 рисунків по тексту, 27 таблиць по тексту. Список використаних джерел містить 118 найменувань на 15 сторінках.

РОЗДІЛ 1

ЗАГАЛЬНІ ПІДХОДИ ТА НАПРЯМКИ ПОШУКУ РІШЕНЬ ЩОДО
ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЧАВУНУ ДЛЯ ВИЛИВКІВ,
ЩО ПРАЦЮЮТЬ В УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ТЕРТЯ
(огляд літератури)

1.1 Деталі, що працюють в умовах абразивного зносу та погляди на вибір сплавів для таких деталей

Підвищення експлуатаційних показників змішувачів, що застосовуються у машинобудуванні та сільському господарстві, висуває низку специфічних вимог щодо конструкторських рішень. Вони стосуються необхідності задоволення відразу кількох вимог, причому іноді протилежних. Це може бути висока продуктивність і висока надійність найбільш навантажених деталей і вузлів при забезпеченні заданих вимог до якості продукту, що змішується. Важливим сьогодні є також забезпечення вимог щодо зниження енерговитратності змішувачів, що пов'язано з необхідністю зменшення масо-габаритних характеристик із збереженням високого ККД за тих же навантажень на робочі органи. Одними з найбільш важливих деталей, щодо яких такі вимоги повинні виконуватися, є органи, що змішують, зокрема лопатки змішувачів. Наявні літературні дані дозволяють виявити типові напрямки вдосконалення конструкцій та матеріалів лопаток змішувачів.

У роботі [1] розглянуто розглянуті методи отримання зносостійких покриттів на основі нітридів металів W та Cr. На основі даних, отриманих рентгенографічним методом, та згідно з визначенням мікротвердості в роботі було проаналізовані структурні та механічні властивості зносостійких покриттів на основі Cr, W та N залежно від умов отримання. Аналіз результатів рентгенографічних досліджень довів, що до складу отриманого покриття належать фази WN, W₂N, CrN із кубічною кристалічною решіткою.

Мікротвердість покриттів суттєво залежала від шорсткості підкладки, а максимальне значення було досягнуто для всіх типів покриттів на зразках, шліфованих абразивом із 1200 зернистістю.

У роботі [2] вказується, що застосування барабанних змішувачів дозволяє отримувати кормові суміші високої рівномірності, усуваючи явище сегрегації та утворення "мертвих" зон. Наявність радіальних лопаток усередині камери розподіляє тіло змішування та збільшує поверхневі потоки, що покращує перерозподіл матеріалу по осі змішування. Але в роботі не визначено стійкість лопаток.

У роботі [3] розглянуто проблему отримання сумішей сипучих матеріалів, яка актуальна для різних галузей промисловості. Розглянуті барабанні змішувачі характеризуються незначним впливом на матеріал, що змішується і можуть використовуватися в технологічних схемах, що вимагають мінімального пошкодження частинок. Представлені конструкції змішувачів мають невеликі габарити та низькі енерговитрати. Вони забезпечують добре згладжування складних коливань на вході за допомогою об'ємного дозування. Час процесу перемішування в них вбирається у кілька хвилин, а різні об'ємні склади забезпечують хорошу якість.

Описані конструкційні рішення спираються на загальноінженерні підходи та вимагають поліпшення із застосуванням сучасних засобів моделювання та проектування, що дозволяють на етапі розробки врахувати безліч важливих факторів, що впливають на експлуатаційні показники. Умови роботи лопаток у процесі експлуатації дозволяють розглядати їх узагальнено у вигляді типової деталі, що працює на абразивне тертя, безвідносно до середовищ, що змішуються. З цієї позиції можна проаналізувати основні інструменти дослідження, які застосовуються для таких типових деталей, умов та показників їх експлуатації. Так, в роботі [4] використано моделювання методом дискретних елементів (DEM), яке швидко поширюється як інструмент моделювання для аналізу процесів, пов'язаних з твердими частинками, а також для задоволення технологічних

потреб у різних аспектах фармацевтичної, харчової промисловості та промисловості з переробки миючих засобів. Приклади включають оцінку параметрів, які складно виміряти або оцінити експериментально (наприклад, поля внутрішніх потоків та схеми змішування), а також полегшують масштабування процесів обробки твердих частинок від лабораторії до експериментальної установки.

У роботі [5] було розглянуто поле потоку в циліндричному контейнері, що рухається крильчаткою з плоскими лопатями. Дослідження проведено за допомогою велосиметрії із зображенням частинок (PIV). Результати показали, що на кінцях лопатей утворювалися вихори, які оберталися разом з ними. У міру того, як лопаті розташовувалися ближче до стінки, вихори взаємодіяли з наведеним прикордонним шаром на стінці, посилюючи обидві області завихрення. Перемішування оцінювалося з використанням конвекційних частинок із нульовою масою шляхом чисельного інтегрування експериментально отриманих полів швидкості. Дані змішування підтвердили розташування областей високого перемішування бар'єрів, показаних аналізом LCS. Результати показали, що перемішування посилювалося в області, що описується рухом лопаті, коли лопать була розташована близько до стінки циліндра.

Робота [6] використовується метод дискретних елементів для моделювання процесу змішування твердих частинок в горизонтальному стрічковому змішувачі з подвійною U-подібною судиною. Індекс змішування, тобто так званий індекс Лейсі, був прийнятий для оцінки якості змішування частинок. Було досліджено вплив робочих та геометричних параметрів, включаючи початкове навантаження, розмір частинок, швидкість обертання робочого колеса та внутрішні лопаті на якість перемішування частинок. Результати показують, що початкове навантаження та швидкість обертання крильчатки мають значний вплив на якість змішування частинок, у той час як два інші параметри мають відносно невеликий вплив. Більш того, вплив кожного параметра на якість перемішування було пояснено

використанням компонентів відносної швидкості між частинами центроїдів після зіткнення. Цей стрічковий змішувач забезпечує набагато більш інтенсивні відносні рухи частинок у вертикальному напрямку, ніж у осьовому та бічному напрямках.

У роботі [7] проводиться дослідження змішування у промислових змішувачах з використанням методу Advanced DEM-CFD. Було виявлено, що швидкість обертання, рівень заповнення, в'язкість рідини та нахил лопаті можуть вплинути на ефективність перемішування. Завдяки значно посиленому конвективному руху частинок більш висока швидкість обертання забезпечує ефективніший процес перемішування. Найменша кількість частинок усередині судини показує кращу продуктивність перемішування, що пояснюється посиленням дифузійного руху частинок. Зменшення в'язкості рідини або збільшення кута нахилу лопаті може призвести до більш ефективного перемішування в домінуючому дифузійному режимі.

У роботі [8] розглядаються методи аналітичної побудови профілю лопатей ротора змішувача, а також математичне моделювання їх роботи з переміщення та перемішування сипких матеріалів на конвеєрі для підвищення ефективності процесу перемішування сировини та оптимізації його експлуатаційних витрат. Були визначені раціональні параметри та геометричні характеристики профілю лопатей роторного змішувача, що сприяють підвищенню якості перемішування металургійної шихти, що транспортується на конвеєрній стрічці.

У дослідженні [9] був використаний м'який метал із низькою зносостійкістю (алюміній серії 6000) для мінімізації часу роботи при максимальній швидкості зносу лопатей. Були розроблені рекомендації щодо використання конфігурацій лопатей різного типу, а також розташування їх відносно один одного.

У роботі [10] розглянуто конструкції існуючих технологічних комплексів по виробництву будівельних сумішей та визначено їх основні

недоліки, з точки зору, застосування в умовах будівельного майданчика. На підставі проведеного дослідження запропоновані конструкції технологічних комплектів. Основою створення запропонованих технологічних комплектів, служать нові конструкції бетонозмішувачів, що працюють в каскадному режимі. Запропоновано методику розрахунку основних параметрів технологічних комплектів обладнання в залежності від використання базової машини комплекту. Однак не представлено результати стійкості вузлу змішування

Виходячи з результатів аналізу [1–10], можна зробити висновок, що обґрунтований вибір матеріалу лопаток не представлений належним чином, що є особливо важливим при проектуванні змішувачів. Лопатки змішувачів у процесі експлуатації перебувають у стані абразивного тертя і їхня довговічність визначається якістю сплаву, з якого вони виготовлені. Використання легованих сталей для цих цілей вимагає реалізації комплексу технологічних процесів, що мають на меті забезпечити задані характеристики міцності робочої поверхні. Такі характеристики одержують, наприклад, перспективними технологіями азотування [11] або борування [12] та оцінюються поверхневою твердістю та глибиною дифузійного шару. Вимоги здешевлення виготовлення лопаток при одночасному забезпеченні високих експлуатаційних властивостей викликають необхідність пошуку найбільш відповідного сплаву. Такими сплавами можуть бути чавуни, леговані різними елементами: Cr, Ni, Cu, Ti, V, що надають чавуну необхідні властивості [13–15].

Виготовлення лопаток з білого чавуну може бути кращим, ніж з легованих сталей [16, 17]. Особливо важливим є вибір хімічного складу білого чавуну, що легується, як правило, бором, для надання високих зносостійких властивостей. Однак можна не обмежуватися лише вибором бору як легуючого елементу. Відомі виробничі дані про ефективне використання як легуючий елемент титану, що застосовується або спільно з бором або з іншими легуючими елементами [18]. Такий вибір обґрунтований

тим, що при легуванні низьковуглецевого доєвтектичного чавуну структура його складається переважно з продуктів розпаду аустеніту, ледебуриту, включень карбіду титану та цементиту голчастої будови. Така структура забезпечує меншу величину твердості, порівняно з чавуном, легованим бором, однак порівнянний з ним коефіцієнт зносостійкості, що оцінюється шляхом визначення втрати маси при терті відносно до еталонного зразку, є високим. Такі чавуни можуть виплавлятися в індукційних печах, що дозволяють:

- швидко вводити та розподіляти легуючі матеріали;
- перегрівати сплав до таких температур, що забезпечують формування заданої мікроструктури [19–21];
- регулювати температурний та шлаковий режими, забезпечуючи стабільність хімічного складу сплаву [22].

Однак наявність окремих виробничих даних про хімічний склад сплаву, його механічні властивості та особливості технології його виробництва, представлені в роботах [11–22], не дає можливості системної оцінки впливу основних факторів формування мікроструктури чавуну на його експлуатаційні властивості. Такими факторами є вуглець і вуглецевий еквівалент, що включає не тільки вуглець, але і кремній і марганець. Ці елементи впливають на положення евтектичної точки на діаграмі стану Fe-C і тому впливають формування кінцевої структури при даній швидкості охолодження сплаву. З урахуванням того, що легування титаном призводить до структурних змін, необхідно розглядати спільний вплив вуглецю, вуглецевого еквівалента та титану на властивості чавуну. Вибираючи за основу два основні показники властивостей, що визначають експлуатаційну придатність чавуну, що працює в умовах абразивного тертя, – коефіцієнт зносостійкості та межа міцності на розтяг – необхідно побудувати математичну модель, що дозволяє обґрунтовано вибирати матеріал на етапі конструювання змішувачів змішувачів. Подібні математичні моделі відносяться до класу моделей «склад–властивості» [23] та в умовах

проведення промислових експериментів будуються методом найменших квадратів за даними пасивного експерименту, зокрема з використанням штучної ортогоналізації [24].

Важливо зауважити, що не лише матеріал лопатей впливає на стійкість в експлуатації, а власне умови експлуатації, типи змішувачів та їх конструкторські параметри, середовище, що впливає на поверхню допатеї та умови навантаження. Так, в роботі [25] об'єктом дослідження був процес подрібнення в барабанному млині при реалізації навантаження ударом, роздавлюванням та стиранням. Враховано ударну, стискаючу та зсувну взаємодії частинок, інтенсивність яких визначається зонами польоту, зсувного шару та твердотільного руху завантаження у поперечному перерізі камери обертового барабана. Вирішувалась проблема визначення впливу швидкості обертання на енергоємність процесу помелу для окремих механізмів навантаження. Було виявлено ефект активізації наступних взаємодій: ударної – при швидкохідному, стискаючої – при середньоходовому та зсувної – при тихохідному обертанні. Як зазначено в цій роботі стосовно впливовості конструкторсько-технологічних факторів, подрібнення в барабанних млинах є доволі енергоємним технологічним процесом [26], тому підвищення їх енергоефективності залишається актуальною науково-технічною задачею [27]. Однак існуючі результати моделювання не дають можливості виявити зв'язок між потужністю приводу та продуктивністю процесу помелу [28], причому задача прогнозування ускладняється одночасним поєднанням дії декількох механізмів навантаження зернистого середовища в камері обертового барабана, що забезпечують реалізацію механізмів руйнування подрібнюваного матеріалу розбиванням, роздавлюванням та стиранням [29–32]. Останнє не може не впливати на стійкість лопатей та стан їх робочих поверхонь. Крім головних механізмів навантаження ударом та зсуванням [29, 30] враховується проміжний механізм стискання [31, 32], а визначальним фактором реалізації механізмів навантаження є швидкість обертання завантаженого барабана

[32]. При цьому за підвищень швидкості зростає ударне навантаження, а зниження швидкості призводить спочатку до стискання завантаження, що забезпечує середнє подрібнення, та при подальшому зниженні – до зсування, що забезпечує тонке подрібнення.

Вплив швидкості обертання на механізми навантаження та руйнування покладено в основу застосування дво- [33] та тристадійного [34] процесів подрібнення в барабанних млинах. Перший полягає у послідовному переході від короткотривалої швидкохідної першої стадії грубого подрібнення переважно ударом до наступної тривалої тихохідної другої стадії тонкого подрібнення переважно зсуванням. Другий доповнюється проміжною другою стадією середнього подрібнення переважно стисканням. Проте кількісні результати впливу швидкості обертання на помел при реалізації різних механізмів навантаження дотепер залишаються невідомими, що обмежує функціональні можливості обладнання та не сприяє розв'язанню проблеми зниження енергоємності процесу. Супутньою проблемою, враховуючи складне навантаження різної природи, є знос робочих поверхонь лопатей, що працюють в жорстких динамічних умовах інтенсивного тертя. Причому важливо зазначити, що існують і більш жорсткі умови, наприклад якщо мова йде, наприклад, про лопаті дробометних апаратів.

Варіантами подолані відповідних труднощів є заміна сплаву для лопатей, заміна матеріалу сплаву, технологічні прийоми виготовлення сплавів або литих деталей. Якщо говорити про сплав, то можна обирати або сталь, або чавун. Останній може бути менш кошторисним, технологічно більш вигідним та за певних умов може показувати близькі до сталі експлуатаційні показники. Зокрема, можна впливати на структуру чавуну, в тому числі здійснюючі перехід від сірого до білого задля підвищення зносостійкості. Так, питання переходу в процесі виготовлення від сірого чавуну до білого розглянуті в роботах [35, 36].

Так, робота [35] заснована на тепловому балансі в процесі затвердіння чавуну. Представлено аналітичний вираз, що пов'язує схильність чавуну до

охолодження з процесами зародження та росту, пов'язаними з евтектичними графітовими та цементитними компонентами. Встановлено взаємозв'язок між схильністю до охолодження та такими факторами, як фізико-хімічний стан рідини, розподіл центрів зародження та щільність центрів зародження евтектичних осередків. Зокрема, встановлено, що схильність до охолодження може бути пов'язана з критичним модулем лиття, що дозволяє визначати мінімальну товщину стінки для охолоджених виливків або ширину загартування в клиноподібних виливках. В цій роботі також обґрунтовується вплив технологічних чинників, таких як хімічний склад розплаву, метод інокуляції, температура і час витримки, на результуючу схильність до охолодження і загартування чавуну. Розвитком цих досліджень є експериментальна перевірка теорії переходу від затвердіння сірого чавуну до затвердіння білого чавуну, результати якої наведені в роботі [36]. Експериментальні випробування проводилися з використанням пластинчастих та клиноподібних виливків різних розмірів. Експерименти включали інокульовані та неінокульовані чавуни різного хімічного складу та температурно-часові залежності ефектів інокуляції. Крім того, було проведено термоаналітичні дослідження для визначення ступеня переохолодження графітової евтектики. Це включало мікроструктурні дослідження встановлення щільності евтектичних осередків. Ця процедура дозволила розрахувати теоретичну ширину загартування та схильність до охолодження чавуну. Було встановлено, що прогнози теоретичного аналізу добре узгоджуються з експериментальними результатами для охолодження, що спостерігається в клиноподібних та пластинчастих виливках. Якщо говорити про експлуатаційні вимоги, які передбачають необхідність покращеної пластичності та ударної в'язкості, то вони можуть бути забезпечені феритним високоміцним чавуном [37], на відміну від білих чавунів, що забезпечують переважно підвищену зносостійкість та високу твердість. Описані переходи важливі для формування мікроструктури, що

може забезпечити високі показники зносостійкості литих деталей, виготовлених з чавуну.

Що стосується технологічних прийомів виготовлення сплавів або литих деталей, що потребують підвищеної зносостійкості та спеціальних властивостей, то наразі виробництво чавунних деталей з різними властивостями в окремих областях (зонах) здійснюється різними способами. Найбільший інтерес представляють методи виготовлення таких деталей шляхом послідовного заливання гетерогенного чавуну в спільну форму [38, 39].

Принципово новий спосіб диференціації структури та властивостей чавуну в різних частинах виливків, позбавлений існуючих проблемних місць, представлено в циклі опублікованих розробок [40–56]. Запропоновані методи базується на можливості цілеспрямованого впливу на структуроутворення модифікуванням [57].

У роботі [58] запропоновано новий метод виробництва двошарових та двосторонніх виливків з диференційованою структурою та властивостями з використанням технології внутрішньоформової модифікування вихідного розплаву, виплавленого в одній плавильній печі, що забезпечує формування твердого зносостійкого білого чавуну як робочого шару, та формування ковкого ударостійкого чавуну з вузлуватим графітом як серцевини або монтажної деталі. Численні лабораторні дослідження підтверджують доцільність запропонованого методу та забезпечують умови, що забезпечують диференціацію структури та властивостей у локальних частинах або шарах виливків. Вказано перспективи методу для виготовлення широкого спектру промислових виливків.

Узагальнення аналізу розглянути джерел дозволяє зробити висновок, що експлуатаційні характеристики деталей, які працюють в умовах тертя, залежать від структурних та фазових характеристик сплаву. Формування таких характеристик залежить від технологічних процесів плавки, позапічної обробки, а також режимів поверхневого зміцнення, що формують зносостійкі

покриття. Тому важливо визначати структурні та фазові характеристики, та відповідні технологічні режими, що їх забезпечують.

1.2 Зносостійкі чавуни як сплав для литих деталей, їх властивості та особливості формування структури

В роботі [59] зносостійкі та корозійностійкі аустенітні чавуни були виготовлені методом порошкової металургії. Особливістю цього сплаву була заміна нікелю з постійним еквівалентним числом Ni (Ni_{eq}) еквівалентним Mn , що виконував роль легуючого елементу. Для порівняння був використаний звичайний чавун з високим вмістом нікелю. Твердість, поведінка при сухому ковзанні та корозійна поведінка звичайного чавуну та запропонованого чавуну досліджувалися за однакових умов. Результат показав, що різниця в твердості чавуну була невелика. Однак зносостійкість запропонованого чавуну була краща завдяки рівномірно розподіленому графіту, причому виявлено, що зносостійкість збільшується зі збільшенням вмісту Mn , що пояснюється підвищеною твердістю. Корозійна поведінка всіх матеріалів, випробуваних за допомогою потенціодинамічних поляризаційних кривих та електрохімічної імпедансної спектроскопії була також однаковою, значною мірою через утворення аустенітної матриці. Кращі показники корозійної стійкості з найнижчою густиною струму корозії та найвищим опором поляризації автори пояснюють різницею потенціалів між матрицею та карбідом, що менша, ніж між матрицею та графітом. Зроблено висновок, що зменшення графіту зі збільшенням карбіду забезпечує високу корозійну стійкість запропонованого чавуну.

В дослідженні [60] визначено вплив технологічних параметрів на отримання спеціального зносостійкого чавуну з кулястим графітом та його абразивний знос. Досліджуваний чавун легувався міддю та молібденом при виплавці в індукційній печі, а кулястий графіт формувався завдяки модифікуванню розплаву у формі. Починаючи з перліто-феритної структури

у вихідному стані, після ізотермічної термообробки структура містила в собі залишковий аустеніт та мартенсит. Вона забезпечувала оптимальні значення абразивного зносу та мікротвердості. Цей чавун демонстрував хороші експлуатаційні показники при виготовленні литих деталей для виготовлення деяких автомобільних вузлів.

В дослідженні [61] представлено результати визначення впливу деформації гарячого прокату на мікроструктурну еволюцію та механізми зношування шаруватих композитів з високохромистого чавуну (HCCI) та низьковуглецевої сталі. Гаряче прокатування у вакуумі при 1200 °C з обтисненням на 30–60 % призвело до вираженого подрібнення та диспергування первинних карбідів, покращення міжфазного зв'язку та перетворення мартенситної матриці на аустеніт. Було визначено наявність зміцнення карбідів M_7C_3 та одночасне пом'якшення матриці, тоді як твердість та ударна в'язкість збільшилися на 40–65 %. Трибологічні випробування продемонстрували зменшення глибини слідів зношування на 48 % та зсув домінуючого механізму зношування з окиснювально-абразивного на окиснювально-втомний режим. Автори пояснюють отримані результати синергетичним ефектом зміцнення карбідів, пластичності матриці та формування стабільної трибоплівки, що забезпечує покращення зносостійкості сплаву.

В роботі [62] зносостійкість хромистого білого чавуну була досліджена за допомогою ортогонального експерименту. Були визначені відмінності між ортогональним проектуванням та штучною нейронною мережею з радіальною базовою функцією. Результати показали, що Cu суттєво впливає на зносостійкість. Було визначено наступні оптимальні склади сплаву: 5,5% Cr , 2% Si , 3% Mn та 2% Cu , а в роботі [63] встановлено, що оптимальний склад білого чавуну становить Cr 4%, Si 3,5%, Mn 3% та Cu 1%.

В роботі [64] аналізується вплив різних добавок кремнію (від 0 до 5,0%) на структуру білого чавуну з високим вмістом хрому, зокрема з вмістом хрому 16,8% та вуглецю 2,56%. Сплави аналізували як в литих, так і в

термічно оброблених умовах. Лиття проводилося в металеві форми, що забезпечувало підвищені значення швидкості затвердіння, ніж у промислових процесах. Було визначено певну ступінь сегрегації кремнію, яка призвела до подрібнення мікроструктури сплаву. Кремній також мав більший вплив на структуру, дестабілізуючи аустенітну матрицю, та сприяв більшому осадженню евтектичних карбідів. Авторами визначено, що при вмісті кремнію понад 3% переважно утворювався перліт, а не мартенсит. Після дестабілізаційної термічної обробки матрична структура чавунів, що містила до 3% Si, складалася з вторинних карбідів у мартенситній матриці з деяким залишковим аустенітом. При цьому визначено, що вищі значення добавки Si утворювали феритну матрицю. Різні мікроструктури литого та термічно обробленого стану корелювали з вибраними механічними властивостями, такими як твердість, мікротвердість матриці та в'язкість розтріскування. Добавки кремнію збільшували мікротвердість матриці в литому стані, але протилежне явище спостерігалось в умовах термічно обробленого стану. Встановлено, що мікротвердість зменшувалася зі збільшенням вмісту кремнію, а об'ємна твердість демонструвала таку ж поведінку. При вмісті до 2% Si спостерігалось збільшення в'язкості розтріскування, а потім зменшення при вищому вмісті кремнію. Таким чином, досліджено вплив додавання кремнію на розмір евтектичних карбідів та отриманої матриці внаслідок цього.

В роботі [65] описано результати введення до гіперевтектичного високохромистого чавуну (ННССІ) оксиду рідкоземельних елементів CeO_2 з метою рафінування попередньо осаджених карбідів M_7C_3 та покращення їхньої зносостійкості. Еволюцію мікроструктури було всебічно проаналізовано за допомогою передових методів мікроскопії, включаючи оптичну мікроскопію (ОМ) та скануючу електронну мікроскопію (СЕМ). Були виміряні їх коефіцієнт тертя та морфологія зносу, а морфологія тертя спостерігалася за допомогою конфокального мікроскопа білого світла. Міжфазну сумісність CeO_2 та M_7C_3 досліджували за допомогою розрахунків

невідповідності кристалічних решіток та моделювання з перших принципів. Представлені експериментальні дані показали, що додавання CeO_2 в кількості 2,0 мас.% ефективно зменшує середній діаметр первинних карбідів M_7C_3 до 6,8 мкм, що супроводжується збільшенням коефіцієнта тертя в стаціонарному стані (з 0,58 до 0,63) та зниженням швидкості зносу на 38,7%. В абсолютних значеннях це складає з $4,675 \times 10^{-6}$ до $2,865 \times 10^{-6}$ $\text{мм}^3/(\text{Н} \cdot \text{м})$. Теоретичні розрахунки показали невідповідність кристалічних решіток 9,23% на межі розділу $\text{CeO}_2(111)/\text{M}_7\text{C}_3(0001)$. Як зазначили автори цієї роботи, CeO_2 може функціонувати як неспонтанне ядро M_7C_3 . На основі отриманих експериментальних даних було побудовано три різні моделі межі розділу ($\text{Ce-M}_7\text{C}_3$, $\text{O1-M}_7\text{C}_3$, $\text{O2-M}_7\text{C}_3$), причому конфігурація $\text{O2-M}_7\text{C}_3$ демонструє оптимальну міжфазну стабільність завдяки максимальній роботі адгезії ($16,29 \text{ Дж/м}^2$) та мінімальній енергії межі розділу ($-9,49 \text{ Дж/м}^2$). На підставі цього зроблено висновок, що CeO_2 може служити неспонтанним ядром M_7C_3 для подрібнення попередньо осадженого карбиду M_7C_3 та підвищення зносостійкості ННССІ.

Новий композитний матеріал для деталей млинів, що сприймають інтенсивне тертя в процесі експлуатації, представлено в роботі [66]. Як зазначають автори цієї роботи, цей інноваційний матеріал є одночасно економічно ефективним та екологічно стійким та виготовляється з промислових відходів високохромистого чавуну (НССІ), армованого частинками оксиду алюмінію (електрокорунду). Технологія виготовлення зносостійкого сплаву передбачала наступні технологічні операції. Стружка НССІ була подрібнена, просіяна та подрібнена з додаванням 20 мас.% електрокорунду. Порошкова суміш $\text{НССІ}+20\%\text{Al}_2\text{O}_3$ була консолідована за допомогою процесу гарячого пресування. Завдяки оптимізації умов процесу було отримано композитний матеріал з надзвичайно високою відносною щільністю 99,84%. В'язкість руйнування в умовах квазістатичного та динамічного навантаження, а також зносостійкість зразків композиту $\text{НССІ}/\text{Al}_2\text{O}_3$ були основними властивостями матеріалу, що досліджувалися

відповідно до передбачуваного застосування. Випробувань на знос включало випробування кулькою на диску, випробування на лінійне абразивне очищення та випробування на абразивоструминну обробку. Як еталонні матеріали використовувалися базові сплави НССІ та НССІ, армовані непокритим зміцненим оксидом алюмінію на основі цирконію. Результати лінійного абразивного випробування та випробування на абразивоструминну обробку продемонстрували кращу зносостійкість композиту НССІ/ Al_2O_3 порівняно з еталонними матеріалами. Однак у випробуванні «кулька на диску» композит НССІ/ Al_2O_3 продемонстрував вищий ступінь зносу порівняно з еталонними матеріалами. Цей ефект авторами роботи було пояснено специфічною мікроструктурою армуючої фази внаслідок чого композит НССІ/ Al_2O_3 було визнано за перспективний матеріал для промислового застосування.

У дослідженні [67] було підготовлено три типи зносостійких матеріалів, включаючи високохромистий чавун (НССІ), середньохромисту литу сталь (МССС) та низькохромисту литу сталь (ЛССС), з подібною макроскопічною твердістю, але різними мікроструктурами та ударною в'язкістю. Зношувальну поведінку цих трьох матеріалів під різними навантаженнями досліджували за допомогою експериментів з ударним зношуванням під динамічним навантаженням та експериментів з тричастинкового зношування під статичним навантаженням. Результати показали, що майже повністю мартенситизований МССС мав найменшу втрату маси в умовах низького динамічного ударного навантаження. Крихкість, пов'язана з великими карбідами, посилювалася зі збільшенням ударного навантаження, що призвело до значного зниження ударної зносостійкості НССІ.

Авторами роботи [67] було також визначено, що залишковий аустеніт швидко перетворювався на мартенсит, тим самим ефективно покращуючи зносостійкість ЛССС. Порівняно з чауном, всі експериментальні сталі характеризувалися втомним зношуванням абразиву на поверхні матеріалу в умовах статичного зношування при низьких навантаженнях та

демонстрували подібну зносостійкість. І навпаки, великі карбіди продемонстрували чудову зносостійкість в умовах високого статичного навантаження, а НССІ мав найкращу зносостійкість. Це може свідчити про те, що спеціальні чавуни є підходящими матеріалами в разі, якщо мова йде про виготовлення деталей, що піддаються інтенсивному зносу в процесі експлуатації та потребують відповідних заходів щодо підвищення стійкості.

Названі роботи демонструють такі тренди, що шляхом підвищення зносостійкості сплавів є комплексне легування та вибір відповідних технологічних заходів. На підтвердження цього можуть бути згадані й роботи [68–75], в яких досліджені аустенітні чавуни, зокрема леговані нікелем, міддю, хромом, оловом, в порівняння з сталями як сплавами, що потребують зносостійких властивостей для експлуатаційних умов.

Автором дослідження [76] в процесі обґрунтування актуальності досліджень проблем підвищення зносостійкості чавунів визначає наступне. Зношування сплаву в процесі експлуатації відбувається через пластичну деформацію поверхневих та приповерхневих матеріалів, що супроводжується відділенням частинок матеріалу внаслідок взаємодії з середовищем тертя [77]. При цьому покращення зносостійкості сплаву є головною передумовою для продовження терміну служби деталей із сірого чавуну, що сприймають тертя. Термічна обробка та модифікація поверхні є традиційними методами підвищення зносостійкості сірого чавуну [78–80], зокрема методом модифікації поверхні є лазерна обробка для підвищення твердості поверхні [81]. При використанні лазерного випромінювання в сірому чавуні відбувається подрібнення дендритів та перетворення фериту та перліту на мартенсит на поверхні литої деталі. Це є визначальним фактором у підвищенні зносостійкості [82]. Також одним із факторів, що можуть впливати на зносостійкість, є рух дислокацій, блокування якого може призвести до підвищення твердості та перешкоджати пластичним змінам матеріалів під напругою. Такого блокування можна досягти використанням керамічних наночастинок TiC-TiB_2 [83]. Для покращення зносостійкості

чавуну можна також використовувати біметалевий метод, який забезпечує бар'єр проти зносу та термічного розтріскування завдяки розвитку твердих інтерметалевих фаз [84], наявність яких, до того ж, допомагає покращити в'язкість та міцність на зсув [85, 86]. Відзначено також, що присутність графітової фази в чавуні викликає складний механізм стирання – коли графіт відділяється від чавуну та прилипає до абразивних поверхонь, він діє як мастило, зменшуючи вагу продуктів зносу до десяти разів [87]. Так, чавуни з ущільненим графітом демонструють найбільшу зносостійкість, тобто морфологія графіту суттєво впливає на властивості зносостійкості [88].

Базуючись на актуальності вирішення проблемних складових, робота [76] присвячена дослідженню оптимальний вплив додавання стружки від обробки Inconel 718 на характеристики зносу композитів із сірого чавуну, використовуючи різні пропорції (1,5, 3 та 5 мас.%) у процесі лиття за виплавлюваними моделями. Було визначено, що додавання 1,5 мас.% стружки призвело до подрібнення графіту типу А до дрібніших форм, а також до невеликої кількості ущільненого графіту. Крім того, збільшення кількості стружки до 3 та 5 мас.% виявило присутність графіту Відманштеттена в отриманих композитах. Завдяки додаванню 1,5 мас.% стружки перлітна матриця в чавуні була подрібнена до дрібнішого перліту. Однак зроблено висновок, що у випадках, коли стружка була присутня у вищих концентраціях поблизу перехідної межі, було виявлено утворення фосфідно-евтектичної або стеадитної фаз, а також карбідів та, в деяких випадках, мартенситу. Показано, що додавання 1,5 мас.% стружки призвело до збільшення твердості зразка зі 180 НВ до 202 НВ. Крім того, композитні зразки, що містили 3 мас.% та 5 мас.% стружки, досягли значень твердості 211 НВ та 250 НВ відповідно. Наявність нерозчинених карбідів поряд з твердими фазами, такими як мартенсит, призвела до збільшення мікротвердості на межі розділу, яка досягла піку 740 НВ. Незважаючи на високу твердість, швидкість зношування зразків з 3 мас.% та 5 мас.% стружки збільшилася на 32% та 78% відповідно порівняно зі зразком чавуну,

але у зразку з 1,5 мас.% стружки спостерігалось зниження швидкості зношування на 34%. Було встановлено, що оптимальна кількість доданої стружки для обробки становила 1,5 мас.% для покращення зносостійкості.

У дослідженні [89] обговорюється вплив підвищеного вмісту Mn на мікроструктуру та зносостійкість високохромистого білого чавуну (HCrWCI), як сплаву з високою продуктивністю в екстремальних умовах зношування. Авторами роботи відзначено, що максимального зміцнення та зносостійкості можна досягти в дестабілізованих умовах шляхом осадження вторинних карбідів та перетворення залишкового аустеніту на мартенсит, що збільшує об'ємну твердість та викликає сили стиску, щоб забезпечити більшу підтримку твердої, але крихкої карбідної фази. Однак при цьому особливо зазначається, що ця мікроструктура не дуже добре працює при повторюваних ударах або ковзному зносі з великими навантаженнями через свою крихкість, схильність до руйнування та розшарування карбіду, а також збільшення втрат від зносу. Тому робиться висновок, що для таких експлуатаційних умов перевагу треба надавати м'якшому, але міцнішому аустенітному чавуну. Визначено, що підвищене додавання Mn демонструє ефективний метод підвищення твердості шляхом деформаційного зміцнення аустеніту для різних сталей. Це було виявлено в рамках систематичного дослідження додавання Mn та Al до білого чавуну з вмістом 12% Cr та 4% Ni для оцінки реакції на деформаційне зміцнення та зносостійкості. Чотири сплави в литих, термічно оброблених та наклепаних умовах були випробувані в умовах сухого ковзання, змінюючи прикладене навантаження. Отримані зразки були охарактеризовані різними методами та проаналізовані для зв'язку мікроструктурних змін зі зносостійкістю. Експериментальні результати, представлені в роботі [89], показали, що навіть коли HCrWCI не піддається об'ємній деформації, ковзання призводить до високого ступеня деформації під поверхнею на мікрорівні, покращуючи зносостійкість сплаву, зберігаючи при цьому міцну серцевину для підвищених контактних напружень. Мікроструктурна характеристика деформованих зразків показала наявність

слідів деформації, спричинених ковзанням дислокацій, тоді як відсутність механічних двійників або мартенситу пояснюється підвищеним вмістом Ni та C, що збільшує енергію дефектів пакування. Також спостерігалось зниження середнього коефіцієнта тертя зі збільшенням смуг деформації. Базовий сплав демонстрував вищий ступінь деформації, адгезії та підвищені значення шорсткості. І навпаки, переважним механізмом зношування в армованих сплавах було окисне зношування, за яким слідував незначний ступінь адгезії та мікророзшаровування, спричинені продуктами зношування між поверхнями ковзання. Автори роблять висновки, що механізми зношування для різного вмісту легуючих добавок та навантажень шляхом аналізу зношених поверхонь та поперечних перерізів демонструє переваги легування з високим вмістом Mn як зручного способу покращення зносостійкості та зменшення потреби в термічній обробці.

Як зазначено в роботі [90], завдяки чудовим властивостям зносостійкості високохромистого білого чавуну (HWC), вища його зносостійкість, ніж у сталевих сплавів, зумовлена вищою об'ємною часткою карбідів (CVF), особливо карбіду типу M_7C_3 , вищою в'язкістю руйнування карбідів, твердішою матрицею та осадженням вторинних карбідів [91–94]. При цьому відзначається, що окрім впливу складових мікроструктури – матриці та карбідів Cr – діючими факторами відносно зносостійкості є властивості абразивних частинок, зокрема їх твердість, форма, розмір, та умови випробувань – температура, прикладене навантаження, час та обертання. Так, визначенням впливу двох прикладених навантажень (2 та 15 Н) на абразивну зносостійкість білого чавуну з вмістом 7,39% Cr з двома різними орієнтаціями карбідів (поздовжньою та поперечною) виявлено, що при навантаженні 2 Н не було суттєвої різниці у швидкості зношування між поперечним та поздовжнім зносом. Однак зносостійкість при поздовжньому орієнтуванні була нижчою, ніж при поперечному, через згинання та площини ковзання цементиту під час випробування [95].

Результати роботи [90] були важливі з точки зору визначення зносостійкості при 1073 К шести різних литих сплавів з добавками перехідних металів (Cr, V, Mo, W, Nb, Ni та Co). На основі їх хімічного складу випробувані матеріали були згруповані у три групи. Перша містить 1 мас.% C - 5 мас.% (V, Mo, W, Cr та Co) з 0 та 10 мас.% Ni (скорочено 1C–5V–0Ni та 1C–5V–10Ni). Друга містить 5 мас.% (Nb, Mo, W, Cr та Co) з 1 та 2 мас.% C, які називаються 1C–5Nb та 2C–5Nb. А третій містить 3 мас.% C - 5 мас.% (V, Mo, W та Co) з 18 та 27 мас.% Cr, які називаються 18Cr-MWCI та 27Cr-MWCI. Результати дослідження [90] показали, що зносостійкість матеріалів (групи 5V та 5Nb) залежить від твердості матеріалу, об'ємної частки карбіду (CVF) та розміру карбіду. З іншого боку, ріст оксидного шару є важливим фактором у 18Cr-MWCI та 27Cr-MWCI, де чим вищий вміст Cr, тим вища зносостійкість. Однак, стійкість до відшаровування або відшаровування карбіду є найважливішим фактором при порівнянні всіх матеріалів, що робить 2C–5Nb найкращим матеріалом у цьому дослідженні, незважаючи на нижчу CVF, твердість та стійкість до окислення.

На основі аналізу розглянутих джерел можна зробити висновок, що показники сплавів формуються фазовим складом. Останній визначається не лише хімічним складом, а й процесами формування мікроструктури. Зважаючи на складність управління цими процесами, що обумовлено багатоваріантністю фазового складу та кількістю хімічних елементів, потрібно будувати математичні моделі типу «склад – властивості».

1.3 Математичні методи синтезу та оптимізації сплавів як частини проектно-експериментальний підходів в розробці технологічних заходів

При синтезі сплавів використовується математичний апарат, спрямований на побудову регресійних рівнянь типу «склад – властивості». Для побудови таких рівнянь використовуються методи планування експерименту. Вони можуть бути активними та пасивними. Так, в роботі [96]

представлено використання планів повного факторного експерименту на основі ортогональних композиційних планів другого порядку, що дозволяє розраховувати коефіцієнти рівняння регресії, що можуть бути віднесені до типу «склад – властивості», та мають вигляд поліному другого ступеня:

$$y_i = b_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 (x_1^2 - \beta) + a_4 (x_2^2 - \beta) + a_5 x_1 x_2, \quad (1.1)$$

де a_i – коефіцієнти, що мають бути розраховані, β – параметр, що має бути розрахований в залежності від числа точок ядра композиційного плану 2^{n-p} та довжини плеча зіркових точок (α) та числа точок в плані експерименту:

$$\beta = \frac{\sum_{j=1}^N (x_i^j)^2}{N} = \frac{2^{n-p} + \alpha}{N} \quad (1.2)$$

Коефіцієнти a_i при цьому визначаються за формулами:

$$a_i = c_1 \sum_{j=1}^N x^j y^j, i = 1, \dots, n \quad (1.3)$$

$$a_i = c_2 \sum_{j=1}^N [(x_{i-n}^j)^2 - \beta] y^j, i = n+1, \dots, 2n \quad (1.4)$$

$$a_i = c_3 \sum_{j=1}^N x_{\mu}^j x_{\lambda}^j y^j, \lambda = 1, \dots, n, \mu \neq \lambda, i = 2n+1, \dots, k \quad (1.5)$$

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y^j - \beta \sum_{i=1}^n a_{n+i} \quad (1.6)$$

В формулах (1.3)–(1.6) c_1, c_2, c_3 є коефіцієнтами для лінійних, квадратичних та парних взаємодій незалежних змінних відповідно, n – число лінійних членів моделі, N – число експериментів.

З використанням зазначеного математичного апарату представлено процес моделювання впливу режимів ущільнення формувальних сумішей на

ефективність процесу ущільнення, виконаного за даними технологічного аудиту роботи струшуючої машини. Показано, що застосування отриманих результатів моделювання дозволяє виявити резерви енергозбереження в технологічному процесі.

Методи пасивного експерименту в отриманні моделей типу «склад – властивості» базуються на використанні методу найменших квадратів (МНК) та представлені, наприклад, в роботі [97] при синтезі складу чавуну із заданими властивостями. В такому випадку коефіцієнти рівнянь регресії у вигляді поліному (1.7) визначаються за допомогою МНК по формулі (1.8)

$$y_i = a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 (x_1)^2 + a_4 (x_2)^2 + a_5 x_1 x_2, \quad (1.7)$$

де a_i – коефіцієнти рівняння регресії, які мають бути розраховані.

$$A = (F'F)^{-1} F'Y = CF'Y, \quad (1.8)$$

а вектор A мінімізує функціонал МНК вигляду

$$J = (FA - Y)^T (FA - Y), \quad (1.9)$$

де F – матриця плану, що має вигляд

$$F = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{11}x_{12} & x_{11}^2 & x_{12}^2 & \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{21}x_{22} & x_{21}^2 & x_{22}^2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n1}x_{n2} & x_{n1}^2 & x_{n2}^2 & \cdot \end{pmatrix},$$

Y – матриця експериментальних значень вихідної змінної, якою при синтезі сплаві може бути межа міцності на розтягування, σ_b , Мпа, як в роботі [97]:

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \cdot \\ y_n \end{pmatrix}.$$

Об'єктом дослідження в роботі [97] є конструкційний чавун з пластинчастим графітом, в якому вуглецевий еквівалент (Секв) знаходиться в діапазоні (4,2–4,4) %, а вміст вуглецю (C) в діапазоні (3,42–3,57) %. Дослідження полягало в описі розподілу величини твердості конструкційного чавуну серійних плавок в факторному просторі C–Секв при фіксованих у вузьких інтервалах значеннях вмісту Cr–Ni–Cu–Ti легуючого комплексу.

Показано, що для отримання працездатного аналітичного опису може бути використано поліноміальне рівняння регресії виду $HB=HB(C, \text{Секв})$. Показано, що така структура рівняння і отримані методом найменших квадратів відповідні оцінки коефіцієнтів забезпечують 92 % точність прогнозу навіть при малій вибірці даних.

У статті [98] описані результати досліджень впливу модуля і щільності рідкого скла на величину поверхневого натягу, які проведені на основі побудови моделі та оптимізації складу рідкого скла методом крутого сходження. Його суть полягає в наступному. На основі малої серії дослідів є локальний опис поверхні відгуку в деякій вихідній області за допомогою моделі лінійного вигляду. У центрі області розраховується лінійне наближення градієнта, й у напрямі градієнта, т. е. у напрямі якнайшвидшого підйому (крутого сходження), проводяться досліді досягнення стаціонарної області, у якій розташований екстремум. Якщо знайдене лінійне наближення градієнта для центру області істотно відрізняється від значення градієнта в деякій точці у напрямку руху, можна знайти новий опис поверхні відгуку за допомогою поліномів першого порядку в околиці цієї точки і розрахувати нове значення градієнта. У стаціонарній області лінійна модель виявляється вже не адекватною, і для опису поверхні відгуку в цій галузі, як правило, використовуються поліноми другого і навіть третього ступеня. У стаціонарній області потрібно провести більшу кількість експериментів, тому що тут необхідно отримати якомога точніше опис. Стратегія крутого

сходження для двовимірної задачі передбачає розрахунок вектор-градієнту безперервної функції $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ у вигляді

$$\text{grad } y = \left(\frac{\partial f}{\partial x_1} i + \frac{\partial f}{\partial x_2} j + \frac{\partial f}{\partial x_3} k + \dots \right). \quad (1.10)$$

Цей вектор перпендикулярний поверхні рівного рівня $y = \text{const}$ і вказує напрямом якнайшвидшого підйому (крутого сходження). У формулі (1.10) i, j, k – одиничні вектори по осях змінних x . Якщо модель лінійна, тобто $y = a_0 x_0 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n$, то коефіцієнти a_i є координатами вектор-градієнта. Якщо змінювати значення вхідних змінних пропорційно знайденим оцінкам коефіцієнтів a_i , то реалізується рух у напрямі якнайшвидшого наближення до оптимуму. Компоненти градієнта та нормованого градієнта експериментально отриманої лінійної моделі залежать від вибору основного рівня та інтервалів варіювання змінних.

Компоненти нормованого градієнта визначаються таким чином:

$$\frac{\text{grad } y}{|\text{grad } y|} = \frac{\frac{\partial f}{\partial x_1} i + \frac{\partial f}{\partial x_2} j + \frac{\partial f}{\partial x_3} k + \dots}{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 \right]^{0.5}} \quad (1.11)$$

Необхідно вибирати інтервали варіювання таким чином, щоб величини коефіцієнтів мали однаковий порядок. У цьому випадку застосування методу крутого сходження є найефективнішим.

Метод крутого сходження складається з послідовних кроків:

1. Побудова лінійної моделі.

Передбачається, що експеримент починається з точки, що досить віддалена від оптимуму (або так званої стаціонарної області); тому для опису поверхні відгуку на околиці початкової точки можна використовувати

лінійну модель. За допомогою факторного планування можна знайти точки проведення експериментів та розрахувати оцінки коефіцієнтів. Цей етап завершується статистичним аналізом отриманої моделі.

2. Покрокове покращення величини цільової функції. Щоб здійснити рух у напрямку оптимуму, необхідно розрахувати напрямок градієнта та визначити величину кроку до наступного досвіду. Координати l -ї точки спостереження за напрямом градієнта знаходяться за формулою:

$$x_i^l = x_i^{l-1} + \lambda a_i, l = 1, L \quad (1.12)$$

де a_i – оцінка i -го коефіцієнта моделі. Так як градієнт завжди проходить через центр плану, то

$$x_i^l = l \lambda a_i \quad (1.13)$$

де λ – обрана величина нормованого кроку. При виборі величини кроку мають значення міркування, близькі до тих, що використовуються під час вибору інтервалу варіювання. Величину кроку для k -го фактору λ_k вибирають із фізичних міркувань, виражаючи її в натуральних одиницях, потім розраховують

$$\lambda = \frac{\lambda_k}{I_k |a_k|}, \quad (1.14)$$

де I_k – інтервал варіювання. Для визначення величини кроку λ_i по іншим змінним у натуральних одиницях використовується таке співвідношення:

$$\lambda_i = \lambda |a_i| I_i \quad (1.15)$$

При цьому виходить, що величини кроків λ_i , завжди співвідносяться один з одним так само, як модулі величин $a_i I_i$, т. е. $\lambda_1 : \lambda_2 : \dots : \lambda_n = |a_1 I_1| : |a_2 I_2| : \dots : |a_n I_n|$.

Якщо з виробничих або технологічних міркувань виявляється неможливим одночасна зміна двох вхідних змінних у процесі крутого сходження, то значення змінної, за якою неможливе сходження, фіксується на якомусь рівні.

Досягнення стаціонарної області дозволяє проводити її аналіз двома методами: гребневим аналізом та перетворенням поверхні відгуку до канонічного вигляді.

Суть гребневого аналізу полягає в наступному [99, 100]. У координатах « $x_1 - x_2$ » будується поверхня відгуку, що є графічним описом впливу вхідних змінних на параметр оптимізації. Потім у цих координатах будується умовний циліндр з радіусом r . Лінія перетину поверхні відгуку та поверхні циліндра даного радіусу розгортається на площину і на ній визначаються точки мінімуму та максимуму. Процедура пошуку субоптимальних значень описується параметрично:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^*(\lambda) = (\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{a}, \\ r^*(\lambda) = \sqrt{\mathbf{x}^{*\top} \mathbf{x}^*}, \\ y^*(\lambda) = \mathbf{a}_0 + 2\mathbf{a}^\top \mathbf{x}^* + \mathbf{x}^{*\top} \mathbf{A} \mathbf{x}^*, \end{cases} \quad (1.16)$$

де $\mathbf{x}^*(\lambda)$ – матриця субоптимальних значень вхідних змінних у нормованому вигляді, що залежать від параметра λ , $\mathbf{x}^{*\top}(\lambda)$ – транспонована матриця субоптимальних значень вхідних змінних, $r^*(\lambda)$ – радіус кола, що обмежує область вхідних змінних, $\mathbf{I}$ – одинична матриця, $\mathbf{a}_0$, $\mathbf{a}_1$, $\mathbf{A}$ – матриці оцінок коефіцієнтів, $\mathbf{a}^\top$ – транспонована матриця оцінок коефіцієнтів при лінійних членах.

Два останні рівняння описують аналітично гребневі лінії, звідки й назва методу.

Так, у дослідженні [101] методом гребеневого аналізу отримано результати оптимізації складу самотвердіючих сумішей з рідким склом та пропіленкарбонатом по критеріям живучості та осипаємості. Запропоновано оптимальний склад цих компонентів суміші та розраховані технологічні режими процесу омагнічування рідкого скла для виготовлення суміші оптимального складу.

У дослідженні [102] методом гребеневого аналізу проведено дослідження поверхні відгуку, що описує математичну модель впливу співвідношення Al/Mg та температури на рідкотікучість Al-Mg сплаву при литті під низьким тиском. Показано, що на основі математичної моделі, яка побудована шляхом реалізації центрального ортогонального композиційного плану (ОЦКП) другого порядку, можуть бути знайдені субоптимальні значення технологічних режимів, що забезпечують отримання максимальних значень рідкотікучості Al-Mg сплаву з урахуванням обмежень, що накладаються на технологічний процес.

У роботі [103] методом гребеневого аналізу досліджено поверхню відгуку, що описує математичну модель впливу температури та вмісту BeO у композитних матеріалах на межу текучості та межу міцності.

У роботі [104] на основі математичної моделі, що описує вплив вуглецю (C) та вуглецевого еквівалента (Секв) на межу міцності на розтягування (σ_v) конструкційного чавуну, виконано параметричний опис поверхні відгуку $\sigma_v = \sigma_v(C, \text{Секв})$. Показано, що для розглянутої моделі у вигляді рівняння регресії застосування гребеневого аналізу дозволяє знайти безліч субоптимальних значень вхідних змінних (C, Секв), що забезпечують отримання марок конструкційного чавуну. Графічне представлення таких множин формує номограму для розрахунку субоптимального хімічного складу конструкційного чавуну.

Суть канонічного перетворення поверхні відгуку полягає в реалізації наступної процедури [23]:

1. Визначення координат стаціонарної точки x^* шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ M & O & M \\ a_{m1} & L & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^* \\ . \\ x_n^* \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} a_1 \\ . \\ a_n \end{pmatrix}.$$

2. Обчислення значення цільової величини у стаціонарній точці:

$$y^* = a_0 + 2a'x^* + x^{*'}Ax^*. \quad (1.17)$$

3. Визначення n власних значень $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$:

$$\begin{vmatrix} a_{11}-\lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22}-\lambda & \dots & a_{2n} \\ . & . & . & . \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn}-\lambda \end{vmatrix} = (-\lambda)^n + P_1\lambda^{n-1} + \dots + P_n = 0. \quad (1.18)$$

4. Запис рівняння поверхні відгуку в канонічній формі:

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2. \quad (1.19)$$

Таким чином, в результаті перенесення та повороту осей та переходу від системи координат $(x_1; x_2)$ в систему координат $(\xi_1; \xi_2)$ забезпечується перетворення вихідного рівняння поверхні відгуку (1.17) до канонічного вигляду

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2, \quad (1.20)$$

$$x=x^*+B\xi, \quad (1.21)$$

де B – матриця повороту, $B'B = I$, а різниця між значеннями вихідної змінної у довільній та стаціонарній точках описується рівнянням:

$$y(\xi)-y^*=\xi'L\xi, \quad (1.22)$$

Так, у роботі [105] об'єктом дослідження є моделі, що описують вплив рідкого скла та пропіленкарбонату як затверджувача формувальної суміші на її властивості. Визначено, що одним з найбільш проблемних місць є виявлення поведінки властивостей суміші за умов відхилення від оптимальних значень вмісту рідкого скла як зв'язуючого та пропіленкарбонату як затверджувача. В ході дослідження використовувалися методи канонічного перетворення поверхні відгуку, що описують вплив вмісту рідкого скла та пропіленкарбонату на наступні властивості суміші: живучість, межа міцності на стиск через 1 годину, через 3 години, через 24 години, осипаємість. Описано механізми хімічних реакцій, що приводять до процесу затвердження суміші та через визначення хімізму процесу обґрунтовано можливість отримання якісних характеристик суміші.

Отримано у канонічному вигляді аналітичний опис поверхні відгуку в стаціонарній області у перетвореному за стандартною процедурою факторному просторі «вміст рідкого скла – вміст пропіленкарбонату», що відносився до моделей типу «склад – властивості». Таке перетворення дозволяє оцінити характер поверхні відгуку через аналіз співвідношень власних чисел, що входять до її канонічного опису, за величиною та знаком. Автори зазначають, що такий підхід має важливу особливість, так як дозволяє безпосередньо визначити поведінку властивостей суміші в разі відхилення від оптимальних значень вмісту рідкого скла та пропіленкарбонату. Завдяки цьому забезпечується можливість визначення заходів або технічних рішень щодо роботи або вдосконалення систем

регулювання процесів дозування в автоматизованих системах виготовлення суміші в ливарних цехах.

Побудові рівнянь регресії передуює перевірка статистичної гіпотези про відповідність закону розподілу вихідної змінної, якою є властивості сплаву, нормальному, а також перевірка інших статистичних гіпотез, що мають за мету виявлення існуючих закономірностей [106]. Для цього визначаються вибіркові функції оцінювання вихідної змінної:

– математичне очікування, – величина, яка розраховується на основі вибірки даних наступним чином:

$$x_{cp} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1.23)$$

де i – номер вимірювання у вибірці даних, x_i – i -е значення у вибірці вимірюваного параметра, $\sum_{i=1}^n$ – операція підсумовування x_i у вибірці.

– дисперсія параметра – величина, що розраховується на основі вибірки даних наступним чином:

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{cp})^2, \quad (1.24)$$

– середньоквадратичне відхилення параметра (СКВ) – величина, що розраховується на основі вибірки даних таким чином:

$$S = \sqrt{S^2}. \quad (1.25)$$

Далі використовуються критерії узгодженості на основі розрахунку асиметрії A а ексцесу E :

$$A = \frac{1}{nS^3} \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^3, \quad (1.26)$$

$$E = \frac{1}{nS^4} \sum_{j=1}^n (y_j - \mu)^4 - 3, \quad (1.27)$$

Закон розподілу може буд визначений за нормальний, якщо виконуються умови:

$$|A| \leq 3\sqrt{D(A)}, \quad (1.28)$$

$$|E| \leq 5\sqrt{D(E)}, \quad (1.29)$$

де

$$D(A) = \frac{6(n-1)}{(n+1)(n-3)}, \quad (1.30)$$

$$D(E) = \frac{24(n-2)(n-3)}{(n+1)^2(n+3)(n+5)}. \quad (1.31)$$

Для перевірки гіпотези про рівність середньоарифметичного значення параметра та заданого значення застосовується критерій

$$T = \frac{(x_{cp} - x_{зад})\sqrt{n}}{S}, \quad (1.32)$$

де $x_{зад}$ – задане значення параметра.

Гіпотеза приймається у разі, якщо отримане значення T не потрапляє у критичну область. Якщо отримане значення T потрапляє у критичну область,

гіпотеза відкидається, тобто робиться висновок, що середньоарифметичне значення не відповідає заданому.

Для перевірки гіпотези про рівність дисперсій параметра, розрахованих за двома вибірками даних, застосовується критерій

$$T = \frac{S_1^2}{S_2^2}, \quad (1.33)$$

де s_1^2 – дисперсія, розрахована за першою вибіркою даних, s_2^2 – дисперсія, розрахована за другою вибіркою даних.

Гіпотеза приймається у разі, якщо отримане значення T не потрапляє у критичну область. Це означає, що дві аналізовані вибірки даних є однією загальною вибіркою даних. Якщо отримане значення T потрапляє у критичну область, гіпотеза відкидається, тобто. робиться висновок, що кожна з вибірок даних є самостійною.

Для перевірки гіпотези про рівність середніх значень параметра, розрахованих за двома вибірками даних, застосовується критерій

$$T = \frac{(x_{1cp} - x_{2cp})}{(S_1^2 / n_1) + (S_2^2 / n_2)}, \quad (1.34)$$

де x_{1cp} – середньоарифметичне значення параметра, розраховане за першою вибіркою даних, x_{2cp} – середньоарифметичне значення параметра, розраховане за другою вибіркою даних,

n_1 – кількість даних у першій вибірці,

n_2 – кількість даних у другій вибірці,

S_1^2 – середньоквадратичне відхилення, розраховане за першою вибіркою даних,

S_2^2 – середньоквадратичне відхилення, розраховане за другою вибіркою даних.

Гіпотеза приймається у разі, якщо отримане значення T не потрапляє у критичну область. Якщо отримане значення T потрапляє у критичну область, гіпотеза відкидається, тобто робиться висновок про те, що середньоарифметичні значення параметра не збігаються. Це може свідчити про наявність систематичної похибки.

Так, в ході дослідження [106] використовувалися методи розрахунку вибірових статистичних функцій, перевірки гіпотези про вид закону розподілу, регресійний аналіз, дисперсійний аналіз, методи теорії ймовірності. Дані методи були інтегровані в загальний алгоритм, названий алгоритмом оцінки «в цілому» якості управління дуплекс-процесом отримання чавуну. Запропонований алгоритм дозволив кількісно оцінити якість управління дуплекс-процесом за таким показником, як ймовірність отримання відхилень за хімічним складом, а також тривалість нестационарного режиму, яка відповідає часу стабілізації хімічного складу шляхом операцій управління процесом, передбаченого прийнятою в цеху системою управління.

В роботі [107] на основі отриманої графічної залежності $Si=f(Al)$, що описує оптимальні хімічні склади чавуну по вмісту Al і Si , які забезпечують максимум межі міцності на розтягування $\sigma_b \approx 245 \dots 334$ МПа, та статистичної перевірки гіпотез, дозволили встановити чи задовольняють умов оптимальності серійні плавки при вибраному рівні значимості $\alpha=0.05$.

При синтезе складів також знайшли використання параметричні методи класифікації [100–111]. Його метою є побудова поверхні, що розділяє кали об'єктів, наприклад сплавів різних марок, в факторному просторі вхідних змінних. Узагальнено суть методу полягає в наступному. Будується дискримінантна функція

$$y = f(x) = x^T \text{cov}^{-1}(x)(m_1 - m_2), \quad (1.35)$$

де $y = f(x)$ – значення дискримінантної функції, $\text{cov}^{-1}(x)$ – матриця, зворотна до коваріаційної, m_1, m_2 – математичні очікування значень факторів-ознак для

класів 1 і 2 відповідно, що розраховуються за формулами (1.36), (1.37) відповідно, де через T позначено операцію транспонування.

$$m_1 = \frac{1}{N_1} \left(\sum_{j=1}^{N_1} x_{1j} \quad \sum_{j=1}^{N_1} x_{2j} \right)^T, \quad (1.36)$$

$$m_2 = \frac{1}{N_2} \left(\sum_{j=1}^{N_2} x_{1j} \quad \sum_{j=1}^{N_2} x_{2j} \right)^T. \quad (1.37)$$

Класифікуюче правило має вигляд

$$x^T \text{cov}^{-1}(x)(m_1 - m_2) = \frac{1}{2} (m_1 + m_2)^T \text{cov}^{-1}(x)(m_1 - m_2). \quad (1.38)$$

На основі отриманого математичного опису поверхні може розділити між собою класи, наприклад сплави одного типу різних марок.

Висновки до розділу 1

1. Одними з основних литих деталей з зносостійкого чавуну є лопатки змішувачів різного функціонального призначення. Обґрунтований вибір матеріалу лопаток не представлений належним чином, що є особливо важливим при проектуванні змішувачів. Лопатки змішувачів у процесі експлуатації перебувають у стані абразивного тертя і їхня довговічність визначається якістю сплаву, з якого вони виготовлені, зокрема хімічним та фазовим складом, що формують структурні та фазові характеристики сплаву. Використання легованих сталей для цих цілей вимагає реалізації комплексу технологічних процесів, що мають на меті забезпечити задані характеристики міцності робочої поверхні. Такі характеристики одержують, наприклад, перспективними технологіями поверхневої хіміко-термічної обробки та оцінюються поверхневою твердістю та глибиною дифузійного шару. Вимоги здешевлення виготовлення лопаток при одночасному забезпеченні високих експлуатаційних властивостей викликають необхідність пошуку найбільш відповідного сплаву. Такими сплавами можуть бути чавуни, леговані різними елементами: Cr, Ni, Cu, Ti, V.

2. Виготовлення лопаток з білого чавуну може бути кращим, ніж з легованих сталей. Особливо важливим є вибір хімічного складу білого чавуну, що легується, як правило, бором, для надання високих зносостійких властивостей. Однак можна не обмежуватися лише вибором бору як легуючого елемента, а спільно з бором використовувати інші легуючі елементи. Це обґрунтовується тим, що при легуванні низьковуглецевого доєвтектичного чавуну структура його складається переважно з продуктів розпаду аустеніту, ледебуриту, включень карбіду титану та цементиту голчастої будови. Така структура забезпечує меншу величину твердості, порівняно з чавуном, легованим бором, однак порівнянний з ним коефіцієнт зносостійкості, що оцінюється шляхом визначення втрати маси при терті відносно до еталонного зразку, є високим.

3. Зносостійкість чавуну може бути покращена завдяки рівномірно розподіленому графіту та збільшенню вмісту Mn, що призводить до підвищеною твердості поверхні. При підвищеному вмісті Mn можна досягти максимального зміцнення та зносостійкості в дестабілізованих умовах шляхом осадження вторинних карбідів та перетворення залишкового аустеніту на мартенсит, що збільшує об'ємну твердість та викликає сили стиску, щоб забезпечити більшу підтримку твердої, але крихкої карбідної фази.

4. Визначено, що шляхом підвищення зносостійкості сплавів є комплексне легування та вибір відповідних технологічних заходів, зокрема таких, що передбачають модифікування при сумісному легуванні нікелем, міддю, хромом, оловом. Це сприяє позитивним результатам по стійкості в умовах тертя в порівнянні із сталями. Можливим технологічним заходом є також модифікація поверхні лазерною обробкою. При використанні лазерного випромінювання в сірому чавуні відбувається подрібнення дендритів та перетворення фериту та перліту на мартенсит на поверхні литої деталі, що є визначальним фактором у підвищенні зносостійкості.

5. Для деталей, що працюють в умовах тертя та потребують підвищених вимог до стійкості в експлуатації, можна використовувати високохромистий білий чавун, що має вищу зносостійкість, ніж у сталевих сплавах, яка зумовлена вищою об'ємною часткою карбідів, особливо карбиду типу M_7C_3 , вищою в'язкістю руйнування карбідів, твердішою матрицею та осадженням вторинних карбідів.

6. В якості математичного апарату, що використовується для синтезу сплавів із заданими чи оптимальними властивостями, доцільно використовувати методи побудови математичних моделей типу «склад – властивості». Такі моделі є рівняннями регресії, що описують поверхні відгуку, які можуть бути проаналізовані гребневим аналізом або шляхом перетворення до канонічного вигляду з метою виявлення оптимумів та загального вигляду поверхні відгуку.

РОЗДІЛ 2

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗНОСОСТІЙКОГО
ЧАВУНУ НА МЕЖУ МІЦНОСТІ ТА КОЕФІЦІЄНТ ЗНОСОСТІЙКОСТІ

2.1 Розробка математичних моделей «склад-властивості» для межі міцності та коефіцієнту зносостійкості

У цій частині дослідження будувалася математична модель, що включає два рівняння регресії:

$$\sigma_b = f_1(C; C_{eq}; Ti) \text{ та } K_{wr} = f_2(C; C_{eq}; Ti),$$

у яких прийнято такі позначення:

σ_b – межа міцності на розтягування, МПа,

K_{wr} – коефіцієнт зносостійкості, %,

C – вміст у сплаві вуглецю, %,

C_{eq} – вуглецевий еквівалент чавуну,

Ti – вміст у сплаві титану, %.

Дані рівняння розглядалися як розвиток моделей, описаних у роботі [14], в яких не було враховано вплив вуглецю як одного з основних елементів, що впливають як на межу міцності, так і на коефіцієнт зносостійкості.

Перше пов'язано з тим, що збільшення вмісту вуглецю призводить до розвитку процесу графітизації, в результаті якого в мікроструктурі утворюється графіт, що грає в суцільній матриці чавуну роль "надрізів", знижуючи тим самим механічну міцність.

Друге пов'язано з тим, що вуглець бере участь у формуванні карбідів різного складу, надаючи поверхні зносостійкості. При цьому, взаємне розташування на діаграмі стану Fe-C вуглецю та вуглецевого еквівалента

виявляються факторами, що істотно впливають на формування мікроструктури, а отже, і властивостей чавуну.

Обґрунтування такого твердження полягає в наступному. Кожен елемент хімічного складу, що входить до чавуну, особливо невід'ємні елементи кремній, марганець, сірка, фосфор, по-різному впливають на положення евтектичної точки на діаграмі стану. Цей вплив приводить до того, що положення фігуративних точок на діаграмі змінюється по обох координатах, що викликає зміни в формуванні мікроструктури чавуну.

Для побудови математичної моделі використовувалася вибірка із виробничих даних, наведених у роботі [18] (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Вихідна вибірка даних

Хімічний склад, %					Властивості	
C	Si	Mn	C _{eq}	Ti	σ_b , кг/мм ²	K _{WT} , %
2.25	1.31	0.95	2.615	0.32	45.2	6.2
2.37	1.4	0.99	2.76	0.63	44.4	11.54
2.26	1.03	1.01	2.539	0.94	38.8	9.57
2.21	1.53	0.95	2.641	1.69	30	9.44
2.4	1.16	1.14	2.714	2.1	31.1	10.8
2.68	1.08	0.6	2.986	0.37	28.4	8.19
2.69	0.93	1.07	2.937	0.75	27.4	9.7
2.53	1.5	1.02	2.949	1.26	36.2	12.27
2.73	1.1	1.21	3.024	2.94	27.9	9.7
3.13	1.6	0.78	3.587	0.28	20.1	8.26
3.34	1.4	1.1	3.727	0.73	24.5	11.07
3.24	1.4	0.98	3.631	1.54	33.9	9.19
3.34	1.72	0.98	3.827	2.5	17.8	8.07

В разі незначного вмісту сірки та фосфору вуглецевий еквівалент C_{eq} розраховувався за формулою:

$$C_{eq} = C + 0.3Si - 0.03Mn, \%, \quad (2.1)$$

Нормування значень вхідних змінних здійснювалося за формулами:

$$x_i = \frac{x_i^* - \bar{x}_i}{I_i}, \quad (2.2)$$

де x_i – нормоване значення i -ї незалежної змінної ($i=1$ для C , $i=2$ для C_{eq} , $i=1$ для Ti),

x_i^* – натуральне значення i -ї незалежної змінної, %,

$\bar{x}_i$ – середнє значення i -ї незалежної змінної, %,

I_i – інтервал варіювання значень i -ї незалежної змінної.

У таблиці 2.2 наведено інтервали варіювання незалежних змінних, а таблиці 2.3 результати розрахунків їх нормованих значень.

Таблиця 2.2 - Варіювання незалежних змінних

Параметри нормування	C, %	C_{eq} , %	Ti, %
Нижня межа інтервалу, %	2.21	2.539	0.28
Верхня межа інтервалу, %	3.34	3.827	2.94
Середнє значення, %	2.775	3.183	1.61
Інтервал варіювання, %	0.565	0.644	1.33

Таблиця 2.3 - Результати розрахунку нормованих значень незалежних змінних

C, %	x_1	C _{eq} , %	x_2	Ti, %	x_3
2.25	-0.929	2.615	-0.882	0.32	-0.97
2.37	-0.717	2.76	-0.657	0.63	-0.737
2.26	-0.912	2.539	-1	0.94	-0.504
2.21	-1	2.641	-0.842	1.69	0.0602
2.4	-0.664	2.714	-0.728	2.1	0.3684
2.68	-0.168	2.986	-0.306	0.37	-0.932
2.69	-0.15	2.937	-0.382	0.75	-0.647
2.53	-0.434	2.949	-0.363	1.26	-0.263
2.73	-0.08	3.024	-0.247	2.94	1
3.13	0.6283	3.587	0.6273	0.28	-1
3.34	1	3.727	0.8447	0.73	-0.662
3.24	0.823	3.631	0.6957	1.54	-0.053
3.34	1	3.827	1	2.5	0.6692

Загальний вид рівнянь регресії приймався за поліноміальний:

$$y_j = a_{0j} + a_{1j}x_{1j} + a_{2j}x_{2j} + a_{3j}x_{3j} + a_{4j}x_{1j}^2 + a_{5j}x_{2j}^2 + a_{6j}x_{3j}^2 + a_{7j}x_{1j}x_{2j} + a_{8j}x_{1j}x_{3j} + a_{9j}x_{2j}x_{3j}, \quad (2.3)$$

де j – індекс вихідної змінної: $j=1$ для σ_b , $j=2$ для K_{wr} .

Коефіцієнти рівнянь (2) оцінювалися методом найменших квадратів:

$$A = (F^T F)^{-1} F^T Y, \quad (2.4)$$

де F – матриця плану експерименту,

F^T – транспонована матриця плану експерименту,

$(F^T F)^{-1} = C$ – дисперсійна матриця,

Y – матриця вихідних змінних (σ_b и K_{wt} , залежно від вихідної змінної, на яку будується рівняння регресії),

A – матриця оцінок коефіцієнтів рівняння регресії.

Для оцінки довірчого інтервалу для σ_b (y_1) и K_{wt} (y_2) розраховувалися нижня та верхня межі вихідних змінних:

$$y^- = y_{расч} - \frac{t_{кр} s}{\sqrt{N}}, \quad (2.5)$$

$$y^+ = y_{расч} + \frac{t_{кр} s}{\sqrt{N}}, \quad (2.6)$$

де s – середнє квадратичне відхилення, що визначається з формули:

$$s = \sqrt{\frac{S_R^2}{\varphi}}, \quad (2.7)$$

де $S_R^2 = \sum_{i=1}^{13} (y_{расч\ i} - y_{эксп\ i})^2$ – сума квадратів відхилень експериментальних значень вихідних змінних від розрахункових, отриманих за рівняннями регресії,

$\varphi = N - (k + 1)$ – число ступенів свободи,

N – число експериментів ($N = 13$),

k – кількість оцінюваних коефіцієнтів при незалежних змінних ($k = 9$),

$t_{кр}$ – критичне значення розподілу Стюдента для довірчої ймовірності 95% та числа ступенів свободи $\varphi = 3$.

Валідація математичної моделі перевірялася шляхом перевірки ступеня відповідності кожного рівняння регресії експериментальними даними. А також оцінюванням потрапляння дійсних експериментальних значень у довірчий інтервал із довірчою ймовірністю 95 %.

В результаті застосування описаного вище методу отримано математичні моделі для обох вихідних змінних. Математична модель є системою двох рівнянь регресії: $\sigma_b=y_1=f_1(x_1, x_2, x_3)$ та $K_{wf}=y_2=f_2(x_1, x_2, x_3)$ та має вигляд:

$$y_1 = 365.0805 + 565.9379x_1 - 613.556x_2 - 20.5485x_3 - 3318.2x_1^2 - 4182.84x_2^2 - 50.0652x_3^2 + 7411.136x_1x_2 + 100.7474x_1x_3 - 69.1735x_2x_3, \quad (2.8)$$

$$y_2 = 12.08145 + 1.917424x_1 - 2.09456x_2 - 0.39929x_3 - 13.2789x_1^2 - 14.3292x_2^2 - 3.20145x_3^2 + 25.76207x_1x_2 + 4.497585x_1x_3 - 5.47818x_2x_3. \quad (2.9)$$

У таблицях 2.4, 2.5 наведено результати статистичної обробки отриманих даних для валідації математичної моделі (2.8) та (2.9) відповідно.

Таблиця 2.4 - Оцінка валідації рівняння $\sigma_b=y_1=f_1(x_1, x_2, x_3)$

$y_{1\text{расч}}, \text{МПа}$	$(y_{1\text{расч}}-y_{1\text{эксп}}), \text{МПа}$	$(y_{1\text{расч}}-y_{1\text{эксп}})^2$	$y_1^-, \text{МПа}$	$y_1^+, \text{МПа}$	$y_{1\text{эксп}}, \text{МПа}$
452	0	0	431	473	452
407	-37	1369	386	428	444
380	-8	64	359	401	388
323	23	529	302	344	300
322	11	121	301	343	311
346	62	3844	325	367	284
258	-16	256	237	279	274
352	-10	100	331	373	362
263	-16	256	242	284	279
191	-10	100	170	212	201
237	-8	64	216	258	245
339	0	0	318	360	339
190	12	144	169	211	178

Примітка:

$$s=23,88689 \text{ МПа,}$$

$$\frac{t_{кр} s}{\sqrt{N}} = 21.1 \text{ МПа}$$

З таблиці 2.4 видно, що з 13 експериментальних точок межі довірчого інтервалу випало лише 3 точки. Це дозволяє вважати модель $\sigma_b=y_1=f_1(x_1, x_2, x_3)$ придатною для прогнозування величини межі міцності з урахуванням того, що для 10 коефіцієнтів, що оцінюються, було використано лише 13 експериментальних точок в умовах пасивного експерименту. Отримання такої прогностичної точності для малої виборки даних є цілком прийнятним результатом.

Таблиця 2.5 - Оцінка валідації рівняння $K_{вр}=y_2=f_2(x_1, x_2, x_3)$

$y_{2\text{расч}}, \%$	$(y_{2\text{расч}}-y_{2\text{эксп}}), \%$	$(y_{2\text{расч}}-y_{2\text{эксп}})^2, \%^2$	$y_2^-, \%$	$y_2^+, \%$	$y_{2\text{эксп}}, \%$
7	0.8	0.64	6	8	6.2
9	-2.54	6.4516	8	10	11.54
9	-0.57	0.3249	8	10	9.57
10	0.56	0.3136	9	11	9.44
11	0.2	0.04	10	12	10.8
9	0.81	0.6561	8	10	8.19
10	0.3	0.09	9	11	9.7
12	-0.27	0.0729	11	13	12.27
9	-0.7	0.49	8	10	9.7
9	0.74	0.5476	8	10	8.26
9	-2.07	4.2849	8	10	11.07
11	1.81	3.2761	10	12	9.19
8	-0.07	0.0049	7	9	8.07

Примітка:

$$s=1.196991 \%,$$

$$\frac{t_{\text{кр}} s}{\sqrt{N}} = 1.1 \%$$

З таблиці 2.5 видно, що з 13 експериментальних точок за межі довірчого інтервалу випало лише 3 точки, тому висновок щодо прогнозних здібностей даної моделі такий самий, як і для моделі $\sigma_b=y_1=f_1(x_1, x_2, x_3)$.

Візуальні результати валідації математичної моделі $\sigma_b=y_1=f_1(x_1, x_2, x_3)$ показано на рис. 2.1.

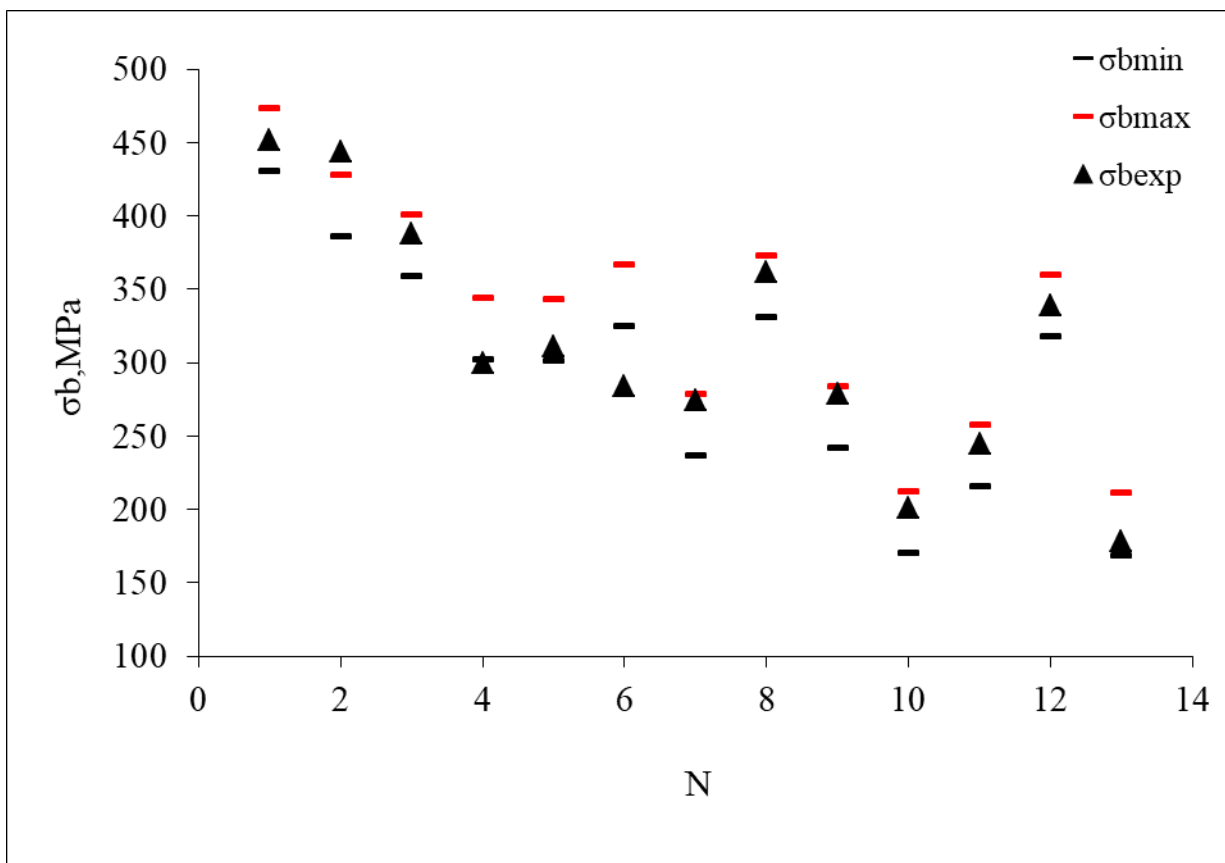


Рисунок 2.1 - Результати валідації рівняння регресії $\sigma_b=y_1=f_1(x_1, x_2, x_3)$

Візуальні результати валідації математичної моделі $K_{\text{wr}}=y_2=f_2(x_1, x_2, x_3)$ показано на рис. 2.2.

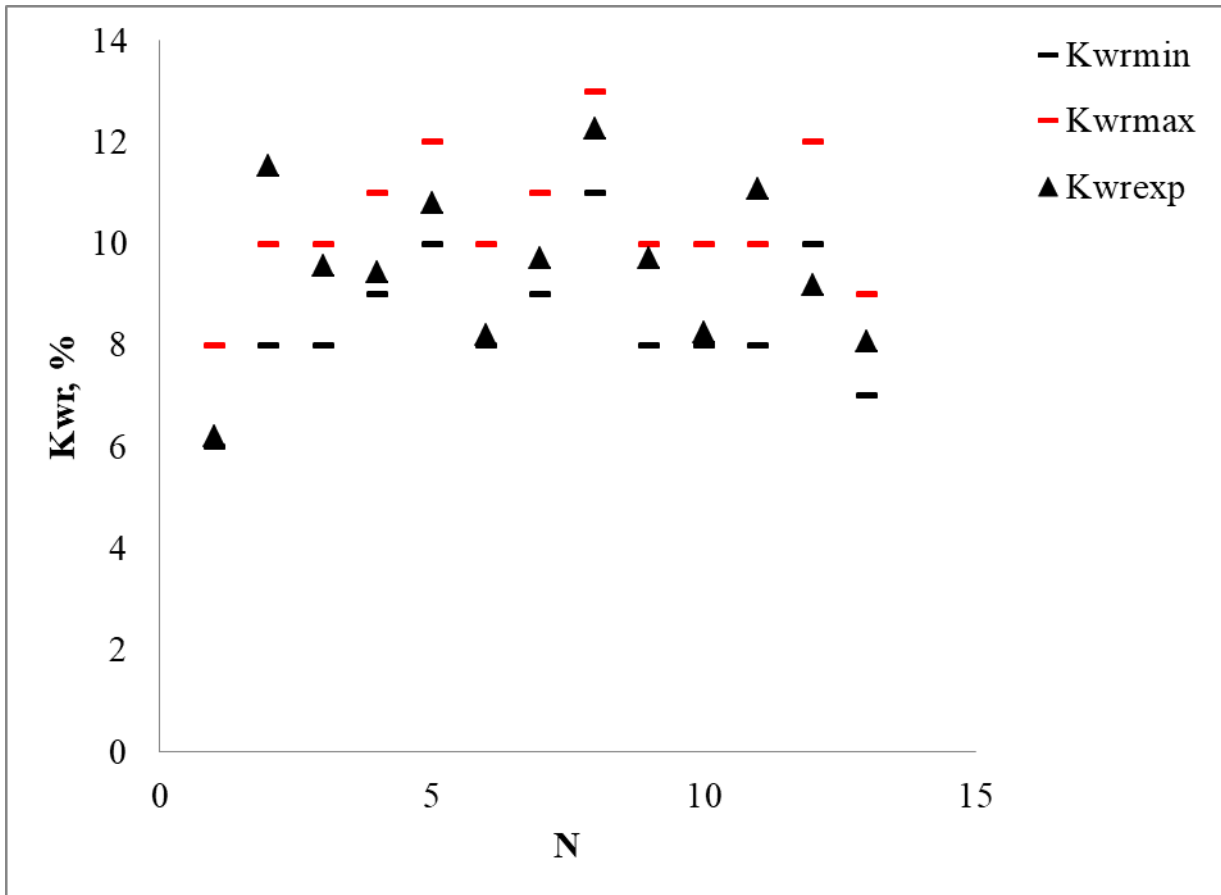


Рисунок 2.2 - Результати валідації рівняння регресії $K_{wr}=y_2=f_2(x_1, x_2, x_3)$

Для практичного застосування отриманих математичних моделей (2.8), (2.9) нормований їхній вигляд наведено до натурального вигляду:

$$\begin{aligned}
 y_1 = & 365.0805 + 565.9379 \frac{x_1 - 2.775}{0.565} - 613.556 \frac{x_2 - 3.183}{0.644} - 20.5485 \frac{x_3 - 1.61}{1.33} - \\
 & -3318.2 \left(\frac{x_1 - 2.775}{0.565} \right)^2 - 4182.84 \left(\frac{x_2 - 3.183}{0.644} \right)^2 - 50.0652 \left(\frac{x_3 - 1.61}{1.33} \right)^2 + \\
 & + 7411.136 \left(\frac{x_1 - 2.775}{0.565} \right) \left(\frac{x_2 - 3.183}{0.644} \right) + 100.7474 \left(\frac{x_1 - 2.775}{0.565} \right) \left(\frac{x_3 - 1.61}{1.33} \right) - \\
 & - 69.1735 \left(\frac{x_2 - 3.183}{0.644} \right) \left(\frac{x_3 - 1.61}{1.33} \right), \tag{2.10}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y_2 = & 12.08145 + 1.917424 \frac{x_1 - 2.775}{0.565} - 2.09456 \frac{x_2 - 3.183}{0.644} - 0.39929 \frac{x_3 - 1.61}{1.33} - \\
& - 13.2789 \left(\frac{x_1 - 2.775}{0.565} \right)^2 - 14.3292 \left(\frac{x_2 - 3.183}{0.644} \right)^2 - 3.20145 \left(\frac{x_3 - 1.61}{1.33} \right)^2 + \\
& + 25.76207 \left(\frac{x_1 - 2.775}{0.565} \right) \left(\frac{x_2 - 3.183}{0.644} \right) + 4.497585 \left(\frac{x_1 - 2.775}{0.565} \right) \left(\frac{x_3 - 1.61}{1.33} \right) - \\
& - 5.47818 \left(\frac{x_2 - 3.183}{0.644} \right) \left(\frac{x_3 - 1.61}{1.33} \right).
\end{aligned} \tag{2.11}$$

Як випливає з отриманих рівнянь, вплив вхідних змінних на межу міцності при розтягування та на коефіцієнт зносостійкості є нелінійним. Це означає, що можливий подальший аналіз відповідних залежностей на наявність екстремумів та визначення оптимального хімічного складу за критерієм максимізації межі міцності при розтягування та коефіцієнту зносостійкості.

2.2 Напрями практичного використання моделей для межі міцності чавуну та коефіцієнту зносостійкості в рамках проектно-експериментального підходу

Отримані моделі можуть бути використані практично двома способами:

- конструкторський,
- експлуатаційний.

Різниця полягає у вимогах та підходах до реалізації.

Спосіб 1: "конструкторський".

Даний спосіб використовується на етапі проектування деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, зокрема абразивного тертя, та відповідних вузлів обладнання, наприклад змішувачів. Він полягає в тому, що конструктор призначає оптимальний хімічний склад чавуну для лопаток змішувачів за критерієм максимальної міцності, який повинен бути забезпечений на етапі поставки лопаток. Вибір саме такого критерію оптимальності обґрунтований тим, що підвищення межі міцності дозволяє

зменшити масогабаритні характеристики лопаток, що безпосередньо впливає із умови:

$$[\sigma_{b1}]S_1 = n[\sigma_{b1}]S_2 \rightarrow S_2 = \frac{S_1}{n}, \quad (2.12)$$

де n – відношення межі міцності оптимізованого за хімічним складом чавуну ($[\sigma_{b2}]$, МПа) до межі міцності типового за хімічним складом чавуну ($[\sigma_{b1}]$, МПа), $n=[\sigma_{b2}]/[\sigma_{b1}]$,

S_1, S_2 – площа робочого перерізу лопатки типової конструкції та оптимізованої конструкції відповідно, м².

Оптимальний хімічний склад може бути знайдений з умови:

$$\frac{\partial y_1}{\partial x_i} = 0, y_1 \rightarrow \max. \quad (2.13)$$

При виборі як критерій оптимізації коефіцієнта зносостійкості, умови для визначення оптимального хімічного складу має аналогічний за своєю структурою вигляд:

$$\frac{\partial y_2}{\partial x_i} = 0, y_2 \rightarrow \max. \quad (2.14)$$

Це означає, що значення вихідних змінних мають бути максимізовані. Це забезпечується екстремальними значеннями вихідних змінних, що визначаються безпосередньо з (2.13) та (2.14).

У таблиці 2.6 наведено результати розрахунку оптимального хімічного складу та очікувані оптимальні показники механічних властивостей.

Дані по хімічному складу, наведені в табл. 2.6, представлені як в натуральному, так і в нормованому формах для зручності розрахунків та практичного використання.

Таблиця 2.6 - Результати розрахунку оптимального хімічного складу та очікувані оптимальні показники механічних властивостей

Оптимальний хімічний склад у нормованому вигляді			Оптимальний хімічний склад у натуральному вигляді, %			Оптимальні механічні властивості	
x_1	x_2	x_3	C	C_{eq}	Ti	σ_b , МПа	K_{wr} , %
0.294	0.188	-0.039	2.94	3.3	1.56	391	—
0.01	-0.064	-0.0006	2.78	3.14	1.61	—	12

З таблиці 2.6 видно, що оптимальний хімічний склад за однією механічною властивістю не відповідає оптимальному хімічному складу за іншою механічною властивістю, хоча вони близькі. Тому при виборі, як пріоритетне, властивості межі міцності слід призначати хімічний склад $C=2.94$ %, $C_{eq}=3.3$ %, $Ti=1.56$ %. Підстановка цих значень в рівняння (2.11) дає максимальний показник коефіцієнта зносостійкості $K_{wr}=12$ %, що свідчить про можливість варіювання оптимального хімічного складу, задаючи його діапазон: $C=(2.78-2.94)$ %, $C_{eq}=(3.14-3.3)$ %, $Ti=(1.56-1.61)$ %. Однак цей висновок має часний характер і не є в загальному випадку однозначним.

Спосіб 2: «експлуатаційний».

Цей спосіб використовується в тому випадку, якщо в процесі експлуатації виникає необхідність заміни зношених лопаток і виробниками пропонуються різні партії, що відрізняються за хімічним складом чавуну. У цьому випадку необхідно задаватися експлуатаційними вимогами до механічних властивостей у вигляді діапазонів $\sigma_b \geq [\sigma_b]$, $K_{wr} \geq [K_{wr}]$, де $[\sigma_b]$, $[K_{wr}]$ – мінімально необхідне гарантоване значення межі міцності та коефіцієнта зносостійкості відповідно. Вибирати слід ту партію, яка забезпечує виконання обох цих умов. Наприклад, виробники пропонують 10

партій лопаток, різних за хімічним складом (табл. 2.7). Необхідно вибрати ті партії, які забезпечують одночасне виконання таких умов: $\sigma_b \geq 300$ МПа, $K_{wr} \geq 10$ %. Приклад рішення ілюструє таблиця 2.7, в якій в останніх двох стовпцях наведено розрахунки з математичних моделей (2.8), (2.9) (у нормованому вигляді) або (2.10), (2.11) (в натуральному вигляді).

Таблиця 2.7 - Приклад практичного застосування математичної моделі для вибору партії лопаток, що задовольняє обраним критеріям

№ партії	Хімічний склад у натуральному вигляді, %					Хімічний склад у нормованому вигляді			Механічні властивості	
	C	Si	Mn	C _{eq}	Ti	x_1	x_2	x_3	σ_b , МПа	K_{wr} , %
1	2.5	0.95	0.6	2.767	0.8	-0.487	-0.646	-0.609	281	9.7
2	2.9	1.1	0.6	3.212	0.8	0.221	0.045	-0.609	348	10.6
3	3.1	1.2	0.9	3.433	0.3	0.575	0.388	-0.985	320	8.4
4	3	1.6	0.9	3.453	2.9	0.398	0.419	0.97	253	7.8
5	2.95	1.4	0.8	3.346	2.9	0.31	0.253	0.97	326	8.6
6	2.4	1.4	0.8	2.796	2.85	-0.664	-0.6	0.932	256	8.4
7	2.4	1.2	0.8	2.736	2.85	-0.664	-0.694	0.932	272	5.4
8	2.5	0.95	0.8	2.761	2	-0.487	-0.655	0.293	262	10.4
9	2.7	0.95	1	2.955	2	-0.133	-0.354	0.293	266	11.2
10	3.2	1.5	1	3.62	2.9	0.752	0.679	0.97	315	7.7

З таблиці 2.7 видно, що обом умовам задовольняє лише партія № 2. Саме цю партію слід брати в постачальника.

Це означає, що отримана математична модель у вигляді двох рівнянь регресії $\sigma_b = f_1(C; C_{eq}; Ti)$ та $K_{wr} = f_2(C; C_{eq}; Ti)$ дозволяє здійснювати цілеспрямований вибір хімічного складу, що забезпечує максимально

можливу величину механічних властивостей – межі міцності та коефіцієнта зносостійкості. Оптимізація хімічного складу, виконана за цією моделлю, дозволила визначити наступний хімічний склад:

– $C=2.94$ %, $C_{eq}=3.3$ %, $Ti=1.56$ %, забезпечує максимум межі міцності $\sigma_b=391$, МПа;

– $C=2.78$ %, $C_{eq}=3.14$ %, $Ti=1.61$ %, забезпечує максимум коефіцієнта зносостійкості $K_{wr}=12$ %.

Встановлено, що забезпечення оптимального хімічного складу за межі міцності забезпечує оптимальність коефіцієнта зносостійкості, що дозволяє призначати наступний діапазон за хімічним складом: $C=(2.78-2.94)$ %, $C_{eq}=(3.14-3.3)$ %, $Ti=(1.56-1.61)$ % за необхідності одночасного задоволення обох умов оптимальності.

У разі пріоритетності критерію міцності розрахований оптимальний хімічний склад дозволяє зменшити масогабаритні характеристики змішувальних вузлів змішувачів.

Отримана математична модель може бути використана двома способами: конструкторським та експлуатаційним. Перший дозволяє конструкторам призначати оптимальний хімічний склад чавуну для лопаток за критерієм максимальної міцності, який має бути забезпечений на етапі постачання лопаток. Другий дозволяє вибирати ту партію лопаток, що поставляються, яка задовольняє заданим експлуатаційним вимогам по міцності і зносостійкості.

2.3 Якісний аналіз синтезованого чавуну по коефіцієнту зносостійкості

Гіпотеза цієї частини дослідження ґрунтувалася на наступному. Маючи в своєму розпорядженні адекватну математичну модель, що описує залежність зносостійкості від вмісту в чавуні вуглецю, положення евтектичної точки на діаграмі стану Fe-C і вмісту титану, а також даними промислових плавок чавуну без титану, можна встановити його

безпосередній вплив на зносостійкість і визначити оптимальне. Завдяки цьому можна буде отримувати сплав з найбільшою зносостійкістю, а також визначати найбільш суттєві фактори, що впливають на стійкість деталей, схильних до абразивного тертя. Зокрема, маючи адекватні залежності зносостійкості від хімічного складу, можна виключити або підтвердити вплив якості робочої поверхні деталей, що контактують з середовищами, що перемішуються. Це особливо важливо у разі, якщо такі поверхні крім тертя схильні до ударних динамічних навантажень, наприклад лопатки дробеметних апаратів (рис. 2.3).

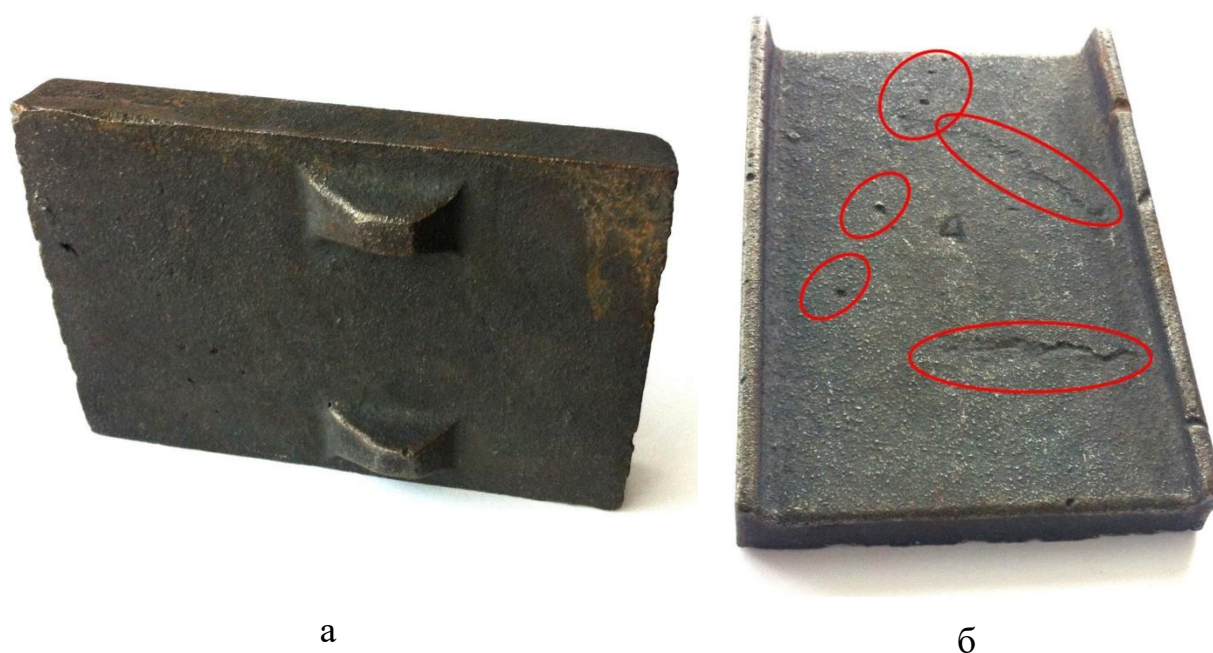


Рисунок 2.3 - Лопатка дробеметного апарату:

а – загальний вигляд, б – робоча поверхня з дефектами

Тому теоретико-аналітичний підхід до дослідження є обґрунтованим. Як вихідні дані для визначення зносу чавуну, що визначається за величиною коефіцієнта зносу (K_{wt} , %) за відсутності титану використовувалися дані, наведені в роботі [15], доповнені розрахунком положення евтектичної точки на діаграмі стану Fe-C (вуглецевим еквівалентом):

$$C_{eq} = C(\%) + 0.3Si(\%) - 0.03Mn(\%). \quad (2.15)$$

Ці дані представлені у таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 - Дані по хімічному складу та коефіцієнту зносостійкості для нелегованого чавуну

Тип білого чавуну	Хімічний склад чавуну, %					Коефіцієнт зносостійкості Kwr, %
	C	Si	Mn	C _{eq}	Ti	
Нелегований	2,17	1,27	0,89	2,52	-	3,38
	2,68	1,3	0,96	3,04	-	5
	3,3	1,28	1,07	3,65	-	4,05

Математична модель, на якій проводилися чисельні розрахунки Kwr, має вигляд (2.9), де вхідні змінні відповідають наведеним у таблиці 2.9 та представлені у нормованому k -мірному просторі ($k=3$). Зв'язок між натуральними та нормованими значеннями задається рівнянням

$$x_i^* = x_i I_i + \bar{x}_i, \quad (2.16)$$

де x_i^* – натуральне значення i -ї незалежної змінної, %,

x_i – нормоване значення i -ї незалежної змінної ($i=1$ для C, $i=2$ для C_{eq}, $i=3$ для Ti),

$\bar{x}_i$ – середнє значення i -ї незалежної змінної, %,

I_i – інтервал варіювання значень i -ї незалежної змінної.

Таблиця 2.9 - Вхідні змінні та інтервали варіювання

Характеристики	C, %	C _{eq} , %	Ti, %
Нижня межа інтервалу, %	2.21	2.539	0.28
Верхня межа інтервалу, %	3.34	3.827	2.94
Середнє значення, %	2.775	3.183	1.61
Інтервал варіювання, %	0.565	0.644	1.33

Нормовані значення вхідних змінних для отримання сплаву без легування титаном (таблиця 2.8) наведені в таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 - Нормовані значення вхідних змінних при виплавці чавуну без легування титаном

No зразка	Натуральні значення вхідних змінних		Нормовані значення вхідних змінних	
	C	C _{eq}	C	C _{eq}
1	2,17	2,52	-1,07	-1,03
2	2,68	3,04	-0,17	-0,22
3	3,3	3,65	0,93	0,73

У натуральному вигляді рівняння (2.9) представляється як (2.11).

Результати розрахунків K_{wr} за моделлю (2.9) для нормованих значень вхідних змінних з таблиці 2.9 у діапазоні $Ti=(0.28; 2.94)\%$ з кроком 0.665%,

що відповідає нормованому вигляді довжині інтервалу $0.5I_3$, наведені в табличному вигляді (таблиця 2.11).

Таблиця 2.11 - Результати чисельного моделювання Kwr

x_0	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	Kwr
1	-1,07	-1,03	-1	1,145	1,061	1	1,102	1,07	1,03	6,5
1	-1,07	-1,03	-0,5	1,145	1,061	0,25	1,102	0,535	0,515	9,2
1	-1,07	-1,03	0	1,145	1,061	0	1,102	0	0	10,2
1	-1,07	-1,03	0,5	1,145	1,061	0,25	1,102	-0,535	-0,515	9,6
1	-1,07	-1,03	1	1,145	1,061	1	1,102	-1,07	-1,03	7,4
1	-0,17	-0,22	-1	0,029	0,048	1	0,037	0,17	0,22	8,9
1	-0,17	-0,22	-0,5	0,029	0,048	0,25	0,037	0,085	0,11	11,3
1	-0,17	-0,22	0	0,029	0,048	0	0,037	0	0	12,1
1	-0,17	-0,22	0,5	0,029	0,048	0,25	0,037	-0,085	-0,11	11,3
1	-0,17	-0,22	1	0,029	0,048	1	0,037	-0,17	-0,22	8,9
1	0,93	0,78	-1	0,865	0,608	1	0,725	-0,93	-0,78	8
1	0,93	0,78	-0,5	0,865	0,608	0,25	0,725	-0,465	-0,39	10,2
1	0,93	0,78	0	0,865	0,608	0	0,725	0	0	10,8
1	0,93	0,78	0,5	0,865	0,608	0,25	0,725	0,465	0,39	9,7
1	0,93	0,78	1	0,865	0,608	1	0,725	0,93	0,78	7

На рис. 2.4 показано результати розподілу значення коефіцієнту зносостійкості за даними чисельного моделювання.

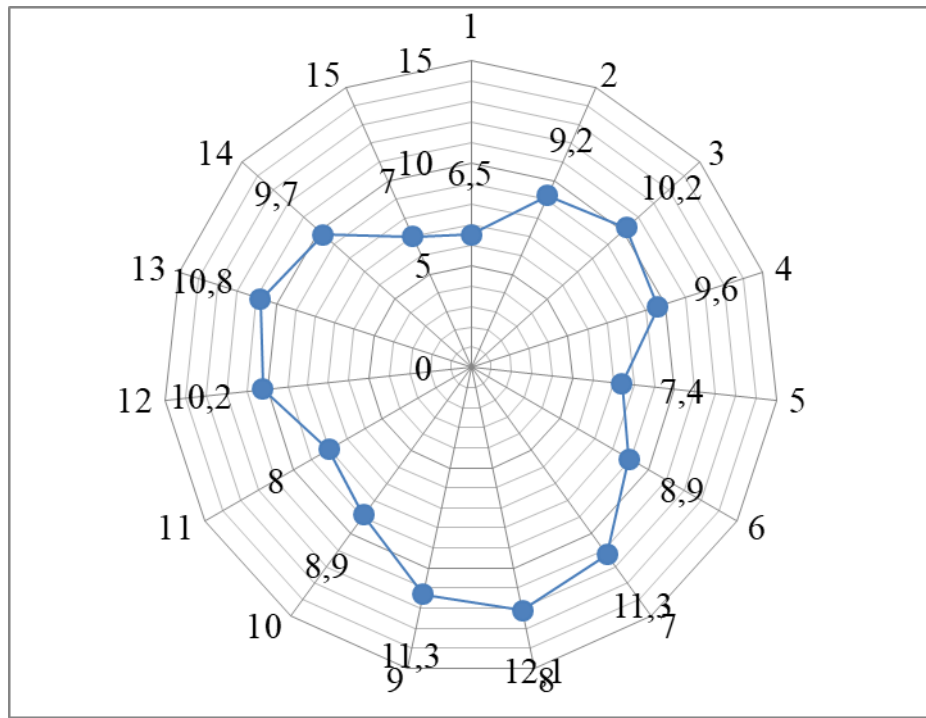


Рисунок 2.4 - Результати чисельного моделювання коефіцієнта зносостійкості

На рис. 2.5 представлені результати апроксимації значень K_{wr} , отриманих чисельним моделюванням.

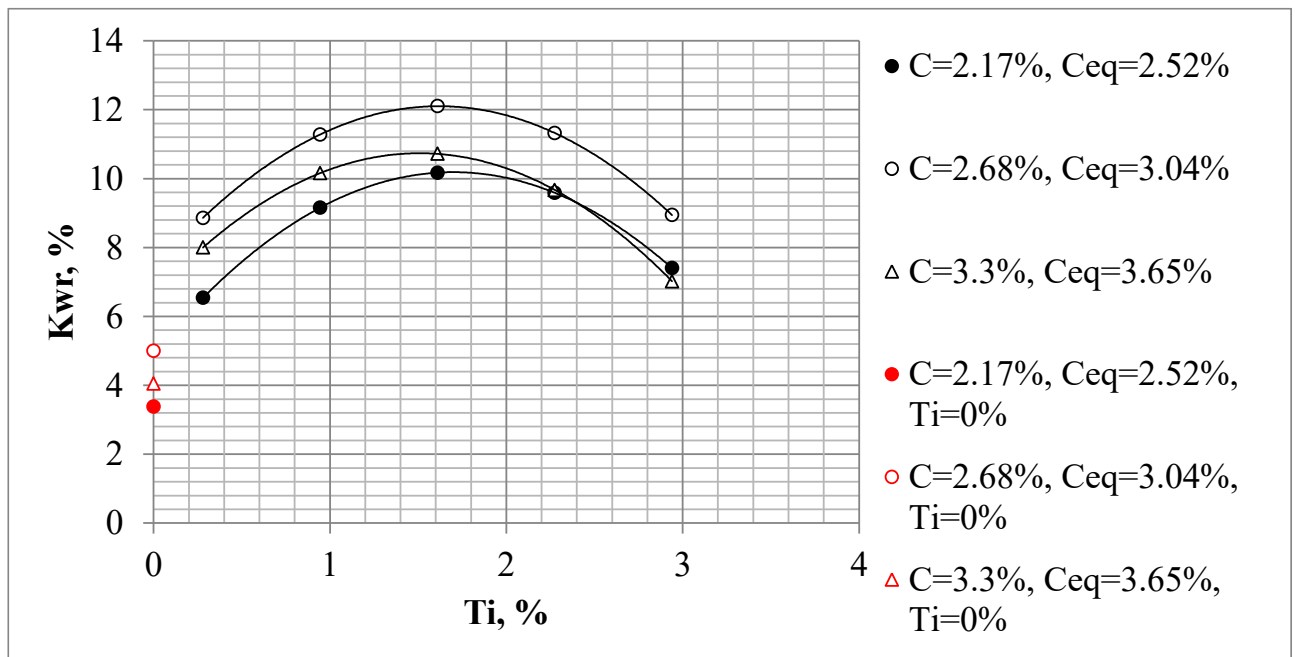


Рисунок 2.5 - Результати чисельного моделювання коефіцієнту зносостійкості чавуну, легованого та нелегованого титаном

З рис. 2.5 видно, що максимальна величина коефіцієнта зношування досягається на середньому рівні вмісту титану, незалежно від значень C та C_{eq} :

– у варіанті $C=2.17\%$ та $C_{eq}=2.52\%$ коефіцієнт зносостійкості дорівнює $K_{wrmax} \approx 10\%$,

– у варіанті $C=2.68\%$ та $C_{eq}=3.04\%$ коефіцієнт зносостійкості дорівнює $K_{wrmax} \approx 12\%$,

– у варіанті $C=3.3\%$ та $C_{eq}=3.65\%$ коефіцієнт зносостійкості дорівнює $K_{wrmax} \approx 11\%$.

Такі результати дозволяють визначити оптимальний за критерієм $K_{wr} \rightarrow \max$ склад сплаву: $C=2.68\%$, $C_{eq}=3.04\%$, $Ti=1.61\%$. Він забезпечує коефіцієнт зносостійкості $K_{wrmax} \approx 12\%$.

Оптимальне значення вуглецевого еквівалента дозволяє оцінити множину допустимих співвідношень Si та Mn у хімічному складі, виходячи з рівняння (2.17)

$$Si(\%) = \frac{0.36 + 0.03 Mn(\%)}{0.3} = 1.2 + 0.1 Mn(\%). \quad (2.17)$$

Розрахунок вмісту кремнію за рівнянням (2.17) при $Mn=0.96\%$ дає результат $Si=1.296\%$, що практично збігається з експериментальним значенням $Si=1.3\%$ (таблиця 2.8).

Аналіз отриманих результатів (таблиця 2.11 та рис. 2.5) дозволяє побачити важливу тенденцію впливу титану на коефіцієнт зносостійкості, а також оцінити вплив на нього співвідношень C та C_{eq} . Так, видно, що використання Ti для легування чавуну із вмістом вуглецю, близьким до сталей, навіть у мінімальній кількості призводить до збільшення коефіцієнта зносостійкості майже на 92%. Збільшення вмісту вуглецю з $C=2.17\%$ до $C=2.68\%$ при мінімальному рівні вмісту титану призводить до збільшення

коефіцієнта зносостійкості на 78%, а збільшення вмісту вуглецю рівня $C=3.3\%$ при мінімальному рівні вмісту титану призводить до збільшення коефіцієнта зносостійкості на 98%.

Привертає увагу той факт, що якщо зміст титану перевищує значення, що забезпечує $K_{wr}=K_{wrmax}$, зміна вмісту вуглецю та положення евтектичної точки практично не впливає на тенденцію зміни величини K_{wr} . Це видно за характером кривих залежностей $K_{wr}=f(Ti)$ для $C=2.17\%$, $C_{eq}=2.52\%$ та $C=3.3\%$, $C_{eq}=3.65\%$, які практично збігаються. При цьому збільшення вмісту титану призводить до погіршення зносостійкості і використання титану в таких кількостях може вважатися необґрунтованим як з точки зору впливу на зносостійкість, так і їх економічних міркувань. Виходячи з цього, напрямом подальших досліджень може полягати в пошуку пояснень цього факту, на рівні аналізу структури, процесів та механізмів її утворення.

Обмеження в цій частині дослідження пов'язані з самою моделлю, так як вона побудована за малою вибіркою даних і довільної області планування, фактично доступною виходячи з наявних експериментальних даних. Варіантом підвищення точності цієї моделі може бути процедура штучної ортогоналізації даних пасивного експерименту. Це дозволило б отримати точніші оцінки коефіцієнтів і перейти до аналізу поверхні відгуку. Однак застосування цієї процедури для розрахунку значень K_{wr} у точках ортогонального плану може зіткнутися з проблемою виявлення діапазонів C , C_{eq} та Ti , всередині яких результати розрахунку будуть адекватними. У цьому випадку необхідно вирішувати обернену задачу – фіксувати значення K_{wr} на рівнях $K_{wr}=K_{wrmin}$ та $K_{wr}=K_{wrmax}$ та визначати допустимі області отримання в чавуні C , Si , Mn та Ti , які формують новий план експерименту.

Таким чином, на основі результатів чисельного моделювання показано, що застосування титану в чавуні, основною вимогою якого є висока зносостійкість, дозволяє значно підвищити коефіцієнт зносостійкості в порівнянні з білим нелегованим чавуном. Так, застосування Ti в кількості 0.28% забезпечує збільшення коефіцієнта зносостійкості на 78–98% залежно

від вмісту вуглецю та вуглецевого еквівалента чавуну. Легування сплаву титаном у кількості 1.61% забезпечує максимально можливе значення коефіцієнта зносостійкості. ($K_{wrmax} \approx 12\%$). Проте подальше збільшення вмісту титану рівня $Ti=2.94\%$ демонструє зворотну тенденцію – величина K_{wr} зменшується до значення $K_{wrmax} \approx (7-9)\%$. Причому, починаючи зі значення $Ti \approx 1.61\%$, кількість вуглецю в сплаві та його вуглецевий еквівалент практично не впливають на характер залежності $K_{wr}=f(Ti)$. При цьому чисельні значення коефіцієнта зносостійкості при тому самому вмісті титану в сплаві практично збігаються.

Оптимальним та рекомендованим хімічним складом чавуну, що забезпечує максимум коефіцієнта зносостійкості, є: $C=2.68\%$, $Ti=1.61\%$, та вміст кремнію у функції вмісту марганцю, що описується лінійним рівнянням виду $Si = a_0 + a_1Mn$, в якому $a_0 = 1.2$, $a_1 = 0.1$.

Висновки до розділу 2

1. Отримано математичні моделі для вихідних змінних, які оцінюють якість та експлуатаційні властивості чавуну, що працює в умовах тертя, та мають забезпечувати вимогу зносостійкості. Ці математичні моделі є системою двох рівнянь регресії: $\sigma_b = y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3)$ та $K_{\text{втр}} = y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3)$

2. Визначено, що вплив вхідних змінних на межу міцності при розтягування та на коефіцієнт зносостійкості є нелінійним. Це означає, що можливий подальший аналіз відповідних залежностей на наявність екстремумів та визначення оптимального хімічного складу за критерієм максимізації межі міцності при розтягування та коефіцієнту зносостійкості.

3. Отримані математичні моделі можуть бути використані практично двома способами: "конструкторським" та «експлуатаційним». Конструкторський спосіб використовується на етапі проектування деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, зокрема абразивного, та відповідних вузлів обладнання. Прикладом обладнання, в якому використовуються такі деталі у вигляді лопаток, є змішувачі різного функціонального призначення. Суть цього способу полягає в тому, що конструктор призначає оптимальний хімічний склад чавуну для лопаток змішувачів за критерієм максимальної міцності, який повинен бути забезпечений на етапі поставки лопаток. Вибір саме такого критерію оптимальності обґрунтований тим, що підвищення межі міцності дозволяє зменшити масогабаритні характеристики лопаток. Це досягається завдяки можливості зменшення товщини стінок завдяки підвищенню межі міцності чавуну. Експлуатаційний спосіб використовується в тому випадку, якщо в процесі експлуатації виникає необхідність заміни зношених лопаток і виробниками пропонуються різні партії, що відрізняються за хімічним складом чавуну. У цьому випадку необхідно задаватися експлуатаційними

вимогами до механічних властивостей у вигляді діапазонів $\sigma_b \geq [\sigma_b]$, $K_{wr} \geq [K_{wr}]$, де $[\sigma_b]$, $[K_{wr}]$ – мінімально необхідне гарантоване значення межі міцності та коефіцієнта зносостійкості відповідно. Вибирати слід ту партію, яка забезпечує виконання обох цих умов.

4. Отримані математичні моделі у вигляді двох рівнянь регресії $\sigma_b = f_1(C; C_{eq}; Ti)$ та $K_{wr} = f_2(C; C_{eq}; Ti)$ дозволяють здійснювати цілеспрямований вибір хімічного складу, що забезпечує максимально можливу величину механічних властивостей – межі міцності та коефіцієнта зносостійкості. Оптимізація хімічного складу, виконана за моделлю коефіцієнта зносостійкості, дозволила визначити наступний хімічний склад:

– $C=2.94$ %, $C_{eq}=3.3$ %, $Ti=1.56$ % – він забезпечує максимум межі міцності $\sigma_b=391$ МПа;

– $C=2.78$ %, $C_{eq}=3.14$ %, $Ti=1.61$ % – він забезпечує максимум коефіцієнта зносостійкості $K_{wr}=12$ %.

Оптимальний хімічний склад за межею міцності забезпечує оптимальність коефіцієнта зносостійкості. Завдяки цьому стає можливим призначати наступний діапазон хімічного складу чавуну: $C=(2.78-2.94)$ %, $C_{eq}=(3.14-3.3)$ %, $Ti=(1.56-1.61)$ % за необхідності одночасного задоволення обох умов оптимальності.

5. Максимальна величина коефіцієнта зношування досягається на середньому рівні вмісту титану, незалежно від значень C та C_{eq} :

– у варіанті $C=2.17\%$ та $C_{eq}=2.52\%$ коефіцієнт зносостійкості дорівнює $K_{wrmax} \approx 10\%$,

– у варіанті $C=2.68\%$ та $C_{eq}=3.04\%$ коефіцієнт зносостійкості дорівнює $K_{wrmax} \approx 12\%$,

– у варіанті $C=3.3\%$ и $C_{eq}=3.65\%$ коефіцієнт зносостійкості дорівнює $K_{wrmax} \approx 11\%$.

Такі результати дозволяють визначити оптимальний за критерієм максимуму коефіцієнта зносостійкості склад сплаву: $C=2.68\%$, $C_{eq}=3.04\%$,

$Ti=1.61\%$. Такий склад зносостійкого чавуну забезпечує коефіцієнт зносостійкості $K_{wrmax} \approx 12\%$.

6. Доведено, що застосування титану в чавуні дозволяє значно підвищити коефіцієнт зносостійкості в порівнянні з білим нелегованим чавуном. Так, застосування Ti в кількості 0.28% забезпечує збільшення коефіцієнта зносостійкості на $78-98\%$ залежно від вмісту вуглецю та вуглецевого еквівалента чавуну. Легування сплаву титаном у кількості 1.61% забезпечує максимально можливе значення коефіцієнта зносостійкості. ($K_{wrmax} \approx 12\%$). Проте вплив титану ж двояким та визначається абсолютним його значенням. Так, збільшення вмісту титану до рівня $Ti=2.94\%$ зменшує коефіцієнт зносостійкості до $K_{wrmax} \approx (7-9)\%$. Причому, починаючи зі значення $Ti \approx 1.61\%$, кількість вуглецю в сплаві та його вуглецевий еквівалент практично не впливають на характер залежності $K_{wr}=f(Ti)$. При цьому чисельні значення коефіцієнта зносостійкості при тому самому вмісті титану в сплаві практично збігаються. Оптимальним та рекомендованим хімічним складом чавуну, що забезпечує максимум коефіцієнта зносостійкості, є: $C=2.68\%$, $Ti=1.61\%$, та вміст кремнію у функції вмісту марганцю, що описується лінійним рівнянням виду $Si = a_0 + a_1Mn$, в якому $a_0 = 1.2$, $a_1 = 0.1$.

Зміст розділу відображено у таких наукових публікаціях [114], [118].

РОЗДІЛ 3

ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКІВ ЛЕГУВАННЯ ЗНОСОСТІЙКОГО ЧАВУНУ

3.1 Визначення впливу на твердість зносостійкого чавуну легування титаном

Метою даної частини дослідження була побудова математичної моделі, що дозволяє прогнозувати твердість HRC за даними хімічного складу чавуну. Об'єктом дослідження був зносостійкий чавун, призначений для литих деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя в процесі експлуатації.

Будувалася математична модель виду $HRC=f(C; C_{eq}; Ti)$, яка представлялася поліномом другого ступеня:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3, \quad (3.1)$$

де вхідними змінними прийнято:

x_1 – вміст у сплаві вуглецю (C, %),

x_2 – вуглецевий еквівалент чавуну (C_{eq} , %),

x_3 – вміст у сплаві титану (Ti, %),

вихідною змінною (y) прийнята твердість HRC.

Вуглецевий еквівалент C_{eq} розраховувався за формулою

$$C_{eq} = C + 0.3Si - 0.03Mn, \%, \quad (3.2)$$

підставою для чого служив той факт, що вміст сірки та фосфору був незначний в допустимих межах.

Розподіл вмісту вуглецю в чавуні, за даними пасивного промислового експерименту, наведений на рис. 3.1.



Рисунок 3.1 - Розподіл вмісту вуглецю в зносостійкому чавуні

З рис. 3.1 видно, що кожний послідовний експеримент проходимо з підвищенням вмісту вуглецю, що мало бути здійснювати графітизуючий вплив на формування мікроструктури.

На рис. 3.2 показано розподіл вмісту кремнію в чавуні.



Рисунок 3.2 - Розподіл вмісту кремнію в зносостійкому чавуні

Як видно з рис. 3.2, вміст кремнію є більш стабільним в порівнянні з вмістом вуглецю, та його кількість є незначною.

На рис. 3.3 показано розподіл вмісту марганцю в чавуні.

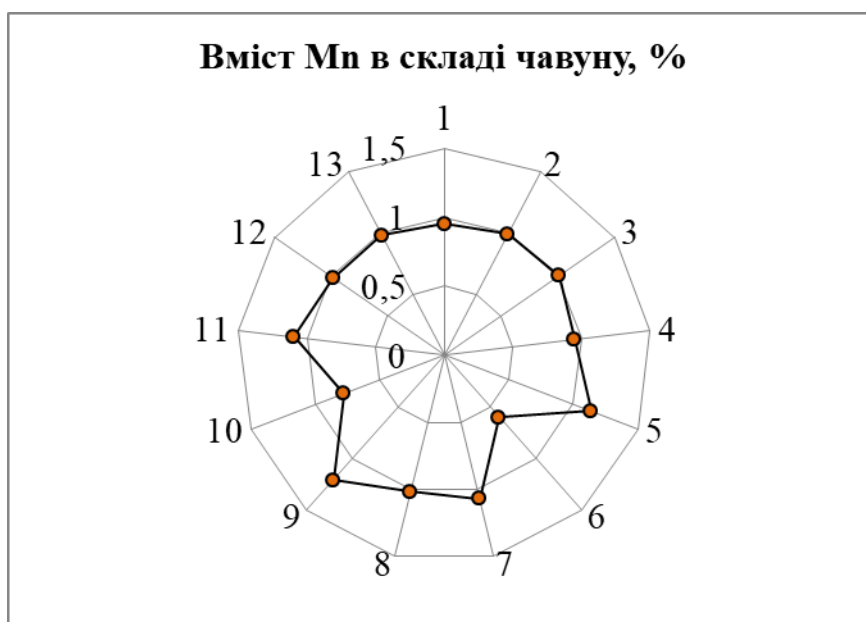


Рисунок 3.3 - Розподіл вмісту марганцю в зносостійкому чавуні

Як видно з рис. 3.3, вміст марганцю майже не змінний та знаходиться в межах 1%, за виключенням плавок №6 та №10, де він менший майже в два рази та №9, де він вищий близько на 20 відсотків. На рис. 3.4 показано розподіл вуглецевого еквіваленту чавуну.

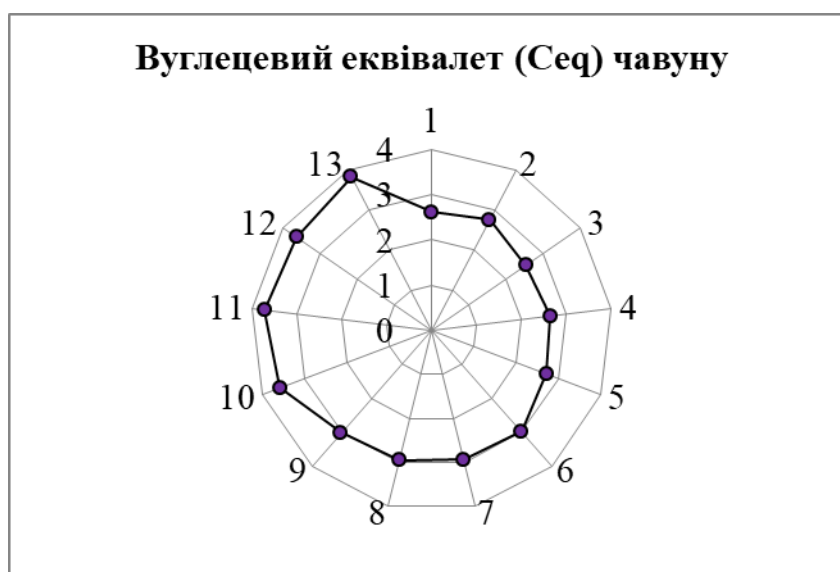


Рисунок 3.4 - Розподіл вуглецевого еквіваленту чавуну

На рис. 3.5 показано розподіл вмісту титану в чавуні.



Рисунок 3.5 - Розподіл вмісту титану в зносостійкому чавуні

Як видно з рис. 3.5, було три блоки експериментального легування титаном від початкового вмісту, близького до 0.5% з послідовним нарощуванням: блок 1 – експерименти №1–5, блок 2 – експерименти №6–9, блок 3 – експерименти №10–13.

Експериментальні значення твердості показані на рис. 3.6.

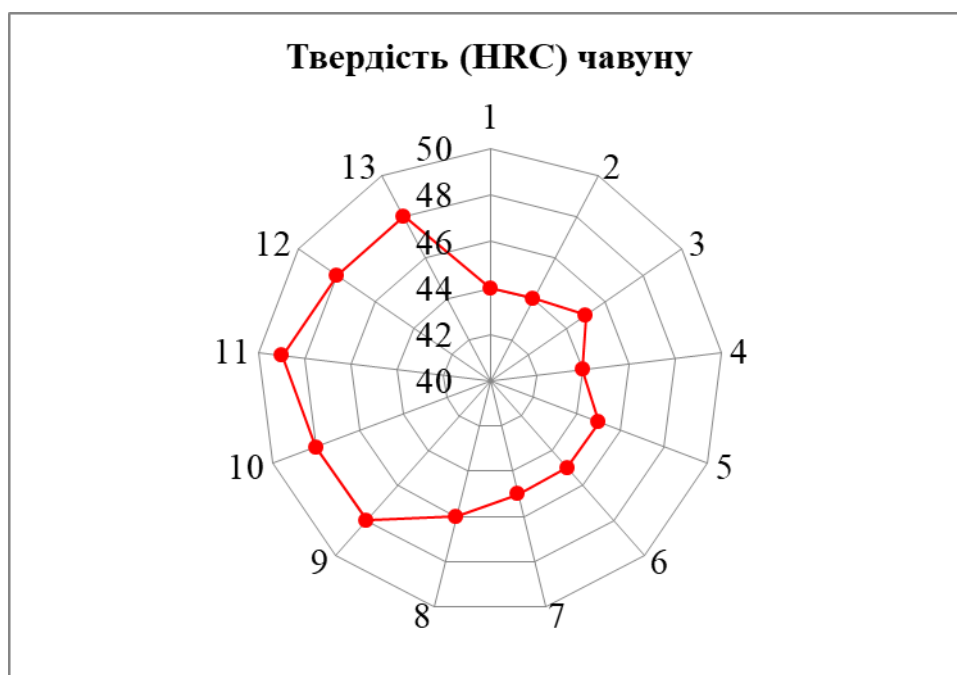


Рисунок 3.6 - Твердість чавуну в експериментах

Нормування значень вхідних змінних здійснювалося за формулою (2.2).

Коефіцієнти рівнянь (3.1) оцінювалися методом найменших квадратів (2.4), статистична обробка даних здійснювалась відповідно до процедури (2.5)–(2.7).

Валідація математичної моделі перевірялася шляхом перевірки ступеня відповідності кожного рівняння регресії експериментальним даним шляхом оцінювання попадання дійсних експериментальних значень в довірчий інтервал з довірчою ймовірністю 99% та 95%.

В результаті отримано математичну модель у нормованому вигляді

$$y = 46.586 + 5.582x_1 - 3.062x_2 + 0.809x_3 - 22.761x_1^2 - 25.389x_2^2 + 0.516x_3^2 + 48.058x_1x_2 - 0.748x_1x_3 - 1.108x_2x_3, \quad (3.3)$$

На рис. 3.7 представлені результати статистичної обробки даних для валідації математичної моделі при обраній довірчій ймовірності $P=0.99$.

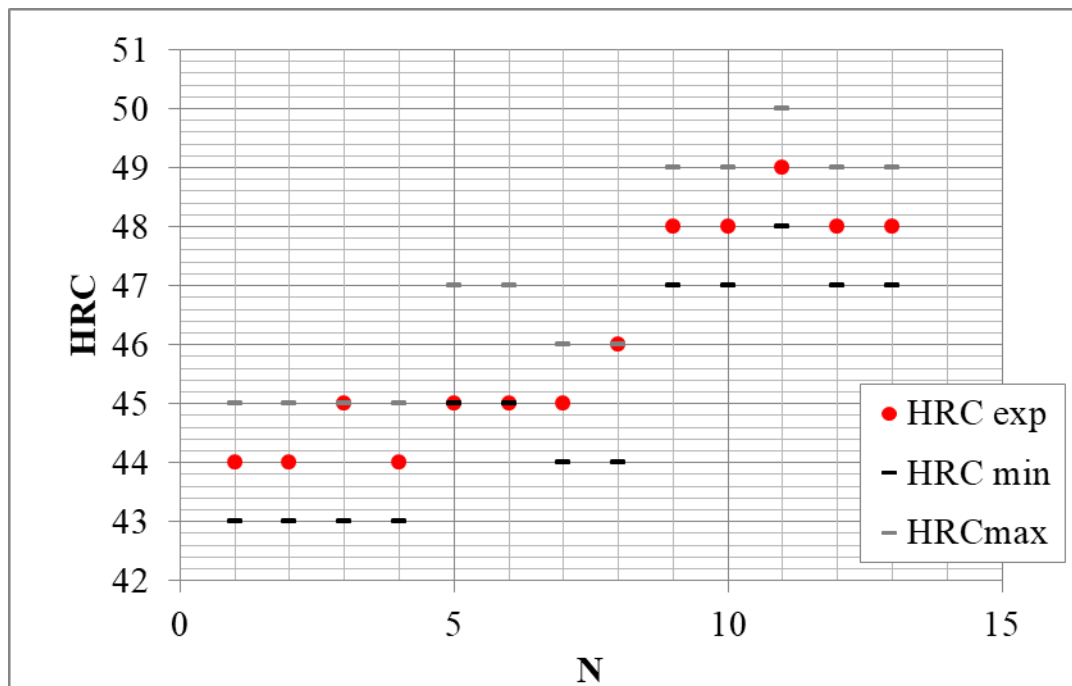


Рисунок 3.7 - Результати валідації рівняння регресії порівнянням розрахункових та експериментальних даних для $P=0.99$

З рис. 3.7 видно, що з обраної довірчої ймовірності всі експериментальні точки потрапили всередину розрахункового діапазону. Це дозволяє зробити висновок, що отримана математична модель працездатна для прогнозування твердості у вибраному інтервалі змінних змін. Однак, якщо задатись довірчою ймовірністю $P=0.95$, дві експериментальні точки з 13 опинилися поза розрахунковим інтервалом – вони показані точками №5 та 6 (рис. 3.8).

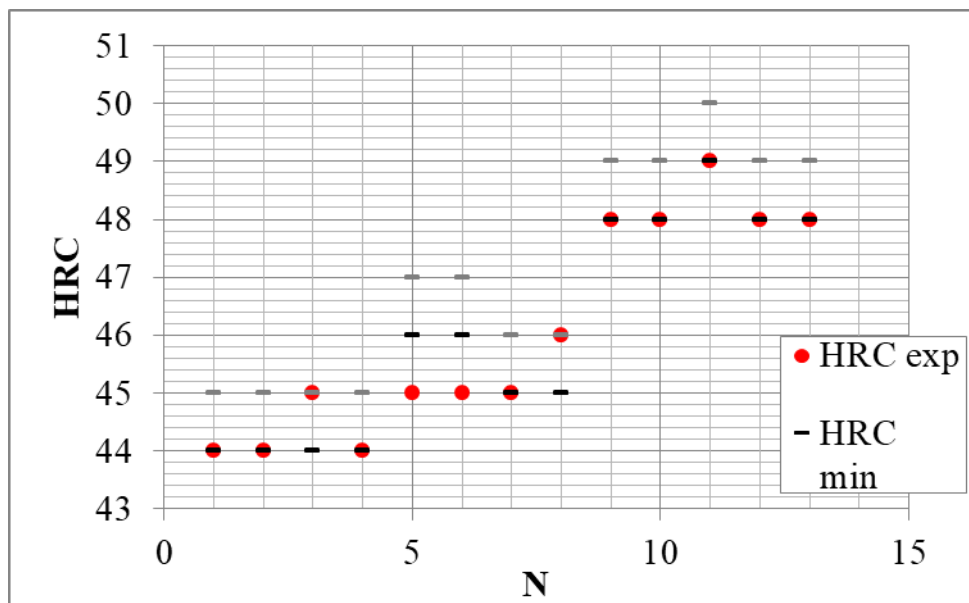


Рисунок 3.8 - Результати валідації рівняння регресії порівнянням розрахункових та експериментальних даних для $P=0.95$

Випадання двох точок дозволяє вважати, що за такого рівня довірчої ймовірності прогнозуюча здатність рівняння (3.3) становить приблизно 85%, що можна вважати практично прийнятним результатом.

Для практичного застосування рівняння (3.3) нормований вигляд наведено до натурального вигляду з урахуванням формули зворотного по відношенню до формули (2.2) розрахунку – перетворенням нормованих значень вхідних змінних в натуральні значення з урахуванням прийнятого середнього значення вхідних змінних та інтервалів їх варіювання по даних пасивного експерименту.

$$\begin{aligned}
HRC = & 46.586 + 5.582 \frac{C - 2.775}{0.565} - 3.062 \frac{C_{eq} - 3.183}{0.644} + 0.809 \frac{Ti - 1.61}{1.33} - \\
& - 22.761 \left(\frac{C - 2.775}{0.565} \right)^2 - 25.389 \left(\frac{C_{eq} - 3.183}{0.644} \right)^2 + 0.516 \left(\frac{Ti - 1.61}{1.33} \right)^2 + \\
& + 48.058 \left(\frac{C - 2.775}{0.565} \right) \left(\frac{C_{eq} - 3.183}{0.644} \right) - 0.748 \left(\frac{C - 2.775}{0.565} \right) \left(\frac{Ti - 1.61}{1.33} \right) - \\
& - 1.108 \left(\frac{C_{eq} - 3.183}{0.644} \right) \left(\frac{Ti - 1.61}{1.33} \right),
\end{aligned} \tag{3.4}$$

Оптимальний хімічний склад може бути знайдений з умови

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} = 0, y \rightarrow \max. \tag{3.5}$$

Формула (3.5) фактично описує відомий шлях знаходження екстремуму функції, якою в даному разі є поліном другого ступеня.

Варто зауважити, що умова (3.5) може бути знайдена саме з нормованого рівняння регресії, що є значно простішим в порівнянні з рівнянням в натуральному вигляді. Отриманий при такому підході результат визначення оптимального складу зносостійкого чавуну може бути використаний для розрахунку дійсного вмісту елементів шляхом зворотного перетворення формули (2.2).

Рішення (3.5) призводить до системи рівнянь загального виду, з якого визначаються значення вхідних змінних у нормованому вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial y}{\partial x_1} = a_1 + 2a_4x_1 + a_7x_2 + a_9x_3 = 0, \\ \frac{\partial y}{\partial x_2} = a_2 + 2a_5x_2 + a_7x_1 + a_8x_3 = 0, \\ \frac{\partial y}{\partial x_3} = a_3 + 2a_6x_3 + a_8x_2 + a_9x_1 = 0, \end{cases} \tag{3.6}$$

У таблиці 3.1 наведено результати розрахунку оптимального хімічного складу та очікувані оптимальні показники твердості зносостійкого чавуну.

Таблиця 3.1 - Результати розрахунку оптимального хімічного складу та очікуваний оптимальний показник твердості

Оптимальний хімічний склад у нормованому вигляді			Оптимальний хімічний склад у натуральному вигляді, %			Максимальна твердість
x_1	x_2	x_3	C	C_{eq}	Ti	HRC
1.349	1.184	1.465	3.54	3.95	3.56	49

З таблиці 3.1 видно, що оптимальний хімічний склад, що забезпечує максимум твердості, знаходиться за межами планування. Слід зазначити, що це область має довільний вигляд, оскільки дослідження проводилося методами пасивного експерименту. Отже, немає підстав повною мірою приймати цей результат однозначно. Для визначення дійсних оптимальних значень вхідних змінних спочатку необхідно проводити процедуру штучної ортогоналізації, що дозволяє перевести пасивний план активний і отримати точні результати розрахунку коефіцієнтів моделі (3.1).

Таким чином, отримане рівняння у вигляді (3.4) може бути використане для прогнозування твердості тільки в діапазоні варіювання факторів, вибраних згідно з планом пасивного експерименту (рис. 3.1–3.5), проте необхідно враховувати реальну область планування, всередині якої отримані результати будуть адекватними в загальному випадку. У цьому полягає обмеження дослідження.

Подальший розвиток дане дослідження може бути спрямований або у напрямку математичного опису області планування, всередині якої отримана модель є працездатною, або в поглибленому вивченні структури чавуну, що відповідає області хімічних складів, що розглядається. В останньому випадку

можливе виявлення механізмів формування твердості, зіставляючи з нею показники мікроструктури. Так, можна вважати, що при легуванні низьковуглецевого доєвтектичного чавуну титаном в кількості, що наведена на рис. 3.5, структура його складається переважно з продуктів розпаду аустеніту, ледебуриту, включень карбіду титану та цементиту голчастої будови (рис. 3.9) [18]. Відповідний фазовий склад забезпечує меншу величину твердості, порівняно з чавуном, легованим бором, однак порівнянний з ним коефіцієнт зносостійкості, що оцінюється шляхом визначення втрати маси при терті, порівнянням з еталонним зразком.

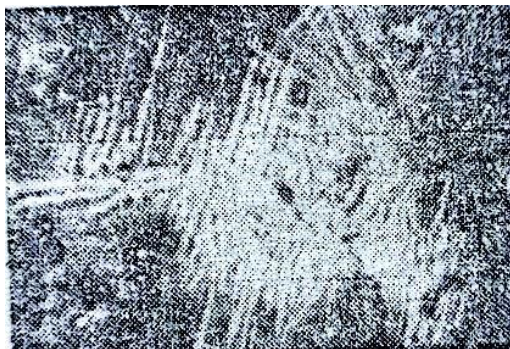


Рисунок 3.9 - Мікроструктура чавуну із вмістом вуглецю $<2.5\%$, легованого титаном, $\times 500$

Таким чином, продукти розпаду аустеніту в центральній частині зерна мають будову дрібнопластинчастого або сорбітоподібного перліту, а периферійна частина має світле забарвлення і через високу дисперсність своїх компонентів має однофазний вигляд.

Такий факт можна пояснити тим, що легування титаном у кількості, представлений на рис. 3.5, призводить до підвищеної стійкості аустеніту, причому внаслідок дендритної ліквідації титану, це особливо проявляється в периферійній частині зерен. Це може розглядатися також як фактор поверхневого зміцнення, що забезпечує формування зносостійкого покриття, яке працює в умовах абразивного зношування.

Отримана математична модель виду $HRC=f(C; C_{eq}; Ti)$ дозволяє здійснювати цілеспрямований вибір хімічного складу, що забезпечує задану

величину твердості. Оптимізація хімічного складу, виконана за цією моделлю, дозволила визначити, що хімічний склад, що забезпечує максимум твердості $HRC=49$, знаходиться за межами області планування: $C=3.54\%$, $C_{eq}=3.95\%$, $Ti=3.56\%$. Однак таке ж значення твердості може бути отримано і всередині розглянутої області планування, причому при вмісті титану поблизу мінімальних значень: $C=3.34\%$, $C_{eq}=3.727\%$, $Ti=0.73\%$. Це свідчить про те, що поверхня відгуку має складний вигляд, що потребує додаткових досліджень на основі попередньої штучної ортогоналізації пасивного експерименту.

Отримана математична модель може бути використана двома способами: конструкторським та експлуатаційним. Перший дозволяє конструкторам призначати оптимальний хімічний склад чавуну за критерієм максимальної твердості. Другий дозволяє вибирати ту партію литих деталей, що поставляються, яка задовольняє заданим експлуатаційним вимогам по зносостійкості, яка залежить від твердості.

3.2 Визначення впливу комплексного легування зносостійкого чавуну титаном на бором на ударну в'язкість

Об'єктом цієї частини дослідження був чавун, легований титаном, з особливими вимогами до зносостійкості та механічних властивостей, а метою було виявлення впливу титану на в'язкість в залежності від вмісту в чавуні вуглецю та вуглецевого еквівалента. Передбачалося, що у разі побудови адекватної математичної моделі у вигляді рівняння регресії $a_n=f(C; C_{eq}; Ti)$, стане можливим оцінювати прогнозовану ударну в'язкість чавуну.

Загальна структура рівняння регресії була прийнята поліноміальною:

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_1^2 + a_5x_2^2 + a_6x_3^2 + a_7x_1x_2 + a_8x_1x_3 + a_9x_2x_3, \quad (3.7)$$

де були прийняті наступні позначення:

x_1 – вміст у чавуні вуглецю (C, %),

x_2 – вуглецевий еквівалент чавуну ($C_{eq}=C+0.3Si-0.03Mn$, %),

x_3 – вміст у чавуні титану (Ti, %),

y – ударна в'язкість чавуну (a_n , MJ/m²).

Експериментальні дані по хімічному складу відповідають складам, наведеним на рис. 3.1–3.5, значення ударної в'язкості відповідають наведеній на рис. 3.10.

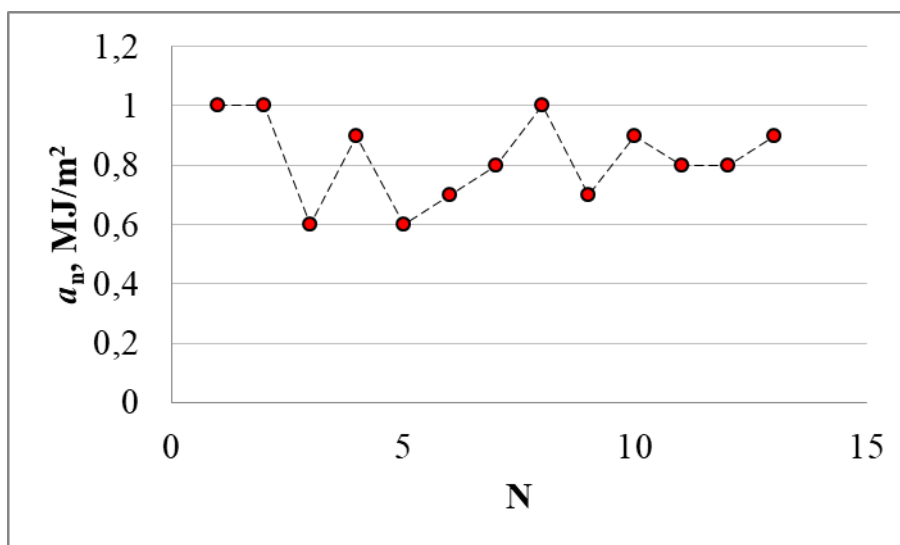


Рисунок 3.10 - Значення ударної в'язкості в експериментах, a_n , MJ/m²

Рівняння регресії будувалося у нормованих значеннях вхідної змінної, нормування здійснювалося за формулою (2.2), а процедура розрахунку коефіцієнтів рівняння регресії та її аналіз здійснювалася згідно з (2.4)–(2.7). Перевірка якості математичної моделі здійснювалася оцінюванням кількості попадань розрахункових значень ударної в'язкості довірчий інтервал (2.5)–(2.6).

На підставі результатів за процедурою отримано рівняння регресії виду (3.7) у нормованій формі:

$$y = 0.863 - 1.15x_1 + 1.206x_2 - 0.066x_3 + 2.946x_1^2 + 2.455x_2^2 + 0.039x_3^2 - 5.536x_1x_2 + 0.137x_1x_3 + 0.073x_2x_3. \quad (3.8)$$

У натуральному вигляді математична модель (3.8) представляється так:

$$\begin{aligned}
 a_n = & 0.863 - 1.15 \frac{C - 2.775}{0.565} + 1.206 \frac{C_{eq} - 3.183}{0.644} - 0.066 \frac{Ti - 1.61}{1.33} + \\
 & + 2.946 \left(\frac{C - 2.775}{0.565} \right)^2 + 2.455 \left(\frac{C_{eq} - 3.183}{0.644} \right)^2 + 0.039 \left(\frac{Ti - 1.61}{1.33} \right)^2 - \\
 & - 5.536 \left(\frac{C - 2.775}{0.565} \right) \left(\frac{C_{eq} - 3.183}{0.644} \right) + 0.137 \left(\frac{C - 2.775}{0.565} \right) \left(\frac{Ti - 1.61}{1.33} \right) + \\
 & + 0.073 \left(\frac{C_{eq} - 3.183}{0.644} \right) \left(\frac{Ti - 1.61}{1.33} \right).
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

У таблиці 3.2 наведено результати оцінки якості математичної моделі отриманої математичної моделі $a_n = f(C; C_{eq}; Ti)$.

Таблиця 3.2 - Результати оцінки якості математичної моделі

Номер експерименту	$y_{\text{exp}},$ MJ/ m ²	$y_{\text{calc}},$ MJ/m ²	$(y_{\text{calc}} - y_{\text{exp}}),$ MJ/m ²	$(y_{\text{calc}} - y_{\text{exp}})^2,$ MJ/m ²	$y^+,$ MJ/m ²	$y^-,$ MJ/m ²
1	1	0,95	-0,05	0,0025	1,03	0,87
2	1	0,98	-0,02	0,0004	1,06	0,9
3	0,6	0,61	0,01	0,0001	0,69	0,53
4	0,9	0,95	0,05	0,0025	1,03	0,87
5	0,6	0,6	0	0	0,68	0,52
6	0,7	0,83	0,13	0,0169	0,91	0,75
7	0,8	0,75	-0,05	0,0025	0,83	0,67
8	1	0,96	-0,04	0,0016	1,04	0,88
9	0,7	0,68	-0,02	0,0004	0,76	0,6
10	0,9	0,88	-0,02	0,0004	0,96	0,8
11	0,8	0,78	-0,02	0,0004	0,86	0,7
12	0,8	0,8	0	0	0,88	0,72
13	0,9	0,92	0,02	0,0004	1	0,84

На рис. 3.11 представлені результати моделювання, з яких видно, що з 13 експериментальних точок довірчий інтервал, отриманий при використанні для розрахунку ударної в'язкості рівняння (3.8), потрапили 12 точок. Це дозволяє говорити про високу прогнозну здатність отриманої математичної моделі, що становить 92,3%.

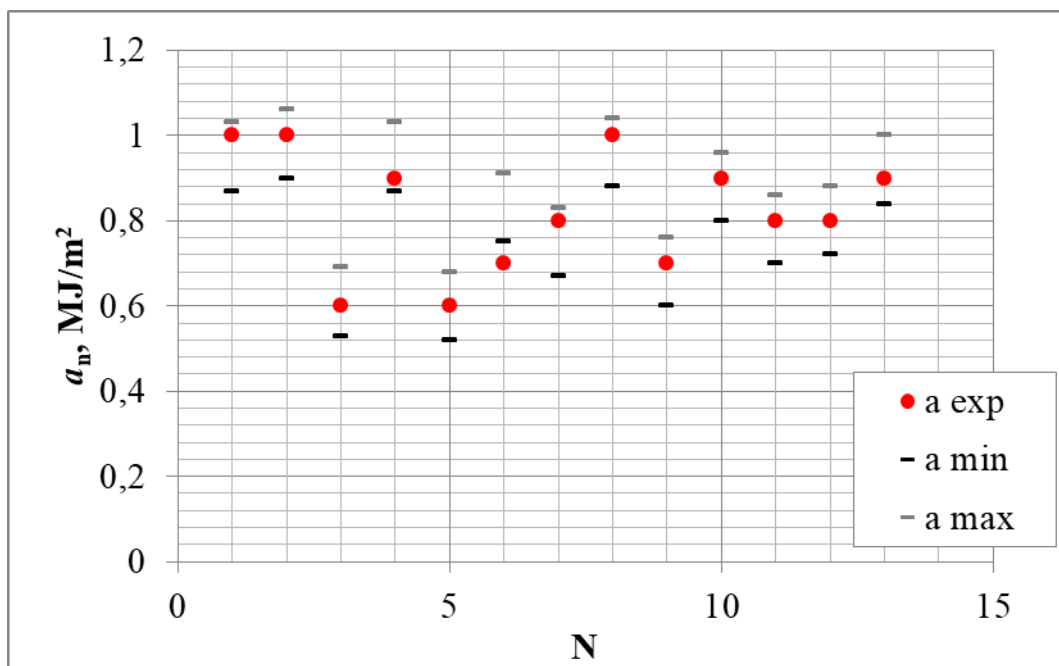


Рисунок 3.11 - Результати розрахунків ударної в'язкості на основі моделі (3.8)

Висока прогнозуюча здатність рівняння регресії (3.8) дозволяє говорити, що це математична модель, яка адекватно описує вплив вуглецю, вуглецевого еквівалента і титану на ударну в'язкість чавуну.

Математична модель (3.9) може бути використана для вибору оптимальних режимів легування. Для цього необхідний якісний аналіз впливу кожної вхідної змінної на величину ударної в'язкості. Для цього послідовно пара вхідних змінних у нормованому вигляді фіксується на рівні, що дорівнює нулю, що відповідає середньому значенню цих змінних у вибраній області планування. Далі за моделлю в нормованому вигляді (3.8) розраховується залежність ударної в'язкості від значень вхідної змінної, що

залишилася, на трьох рівнях, відповідно обраному діапазону варіювання. Результати таких розрахунків наведено на рис. 3.12, 3.13.

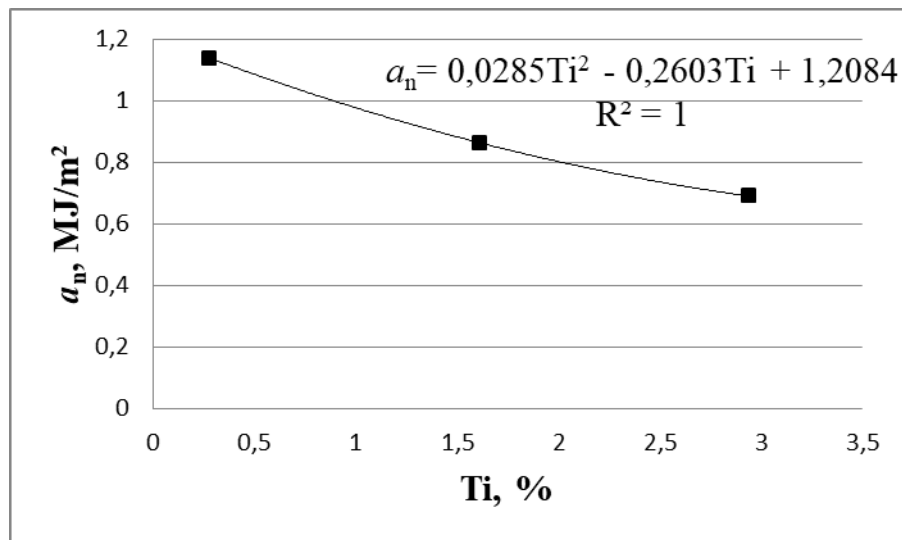


Рисунок 3.12 - Залежність ударної в'язкості від вмісту титану при середніх значеннях вмісту вуглецю ($C=2.775\%$) та вуглецевого еквівалент ($C_{eq}=3.183\%$)

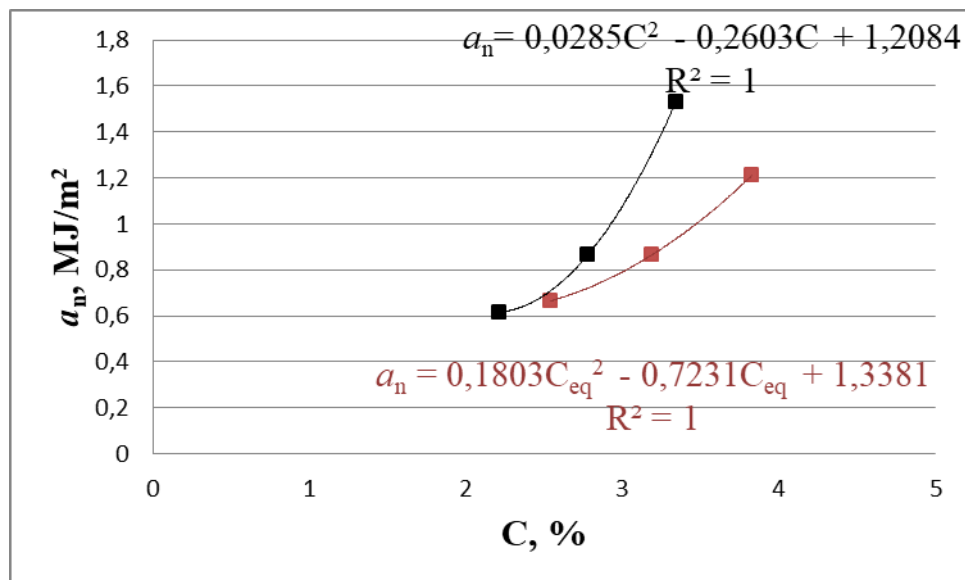


Рисунок 3.13 - Залежність ударної в'язкості від:

- вмісту вуглецю при середніх значеннях вуглецевого еквівалента ($C_{eq}=3.183\%$) та вмісту титану ($Ti=1.61\%$),
- вуглецевого еквівалента при середніх значеннях вмісту вуглецю ($C=2.775\%$) та вмісту титану ($Ti=1.61\%$)

Отримана математична модель може бути використана не тільки для розрахунку очікуваної ударної в'язкості на підставі фактичного хімічного складу сплаву. Вона може бути використана для визначення доцільності застосування інших легуючих елементів крім титану, наприклад бору.

На рис. 3.14 представлені результати використання бору у комбінації з титаном.

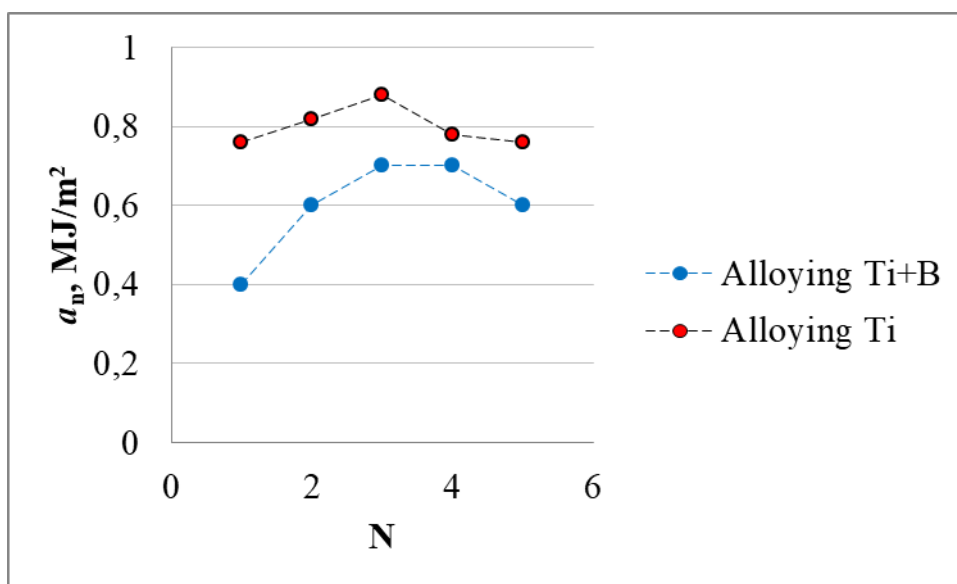


Рисунок 3.14 - Порівняльна характеристика ударної в'язкості при легуванні чавуну титаном і при сумісному легуванні з бором. Дані для варіанта легування титаном отримані розрахунком за рівнянням (3.8)

На рис. 3.15 представлений хімічний склад 5 різних плавок при суміщеному легуванні (Ti+B).

Дані, наведені на рис. 3.15, дозволяють провести співставлення хімічного складу по використаних вхідних змінних для визначення впливовості суміщеного легування та ударну в'язкість. Це створює умову для «вирівнювання» вхідних даних для проведення порівняння та визначення доцільності додаткового легування бором, що безпосередньо пов'язано з витратами на реалізацію технологічного процесу.

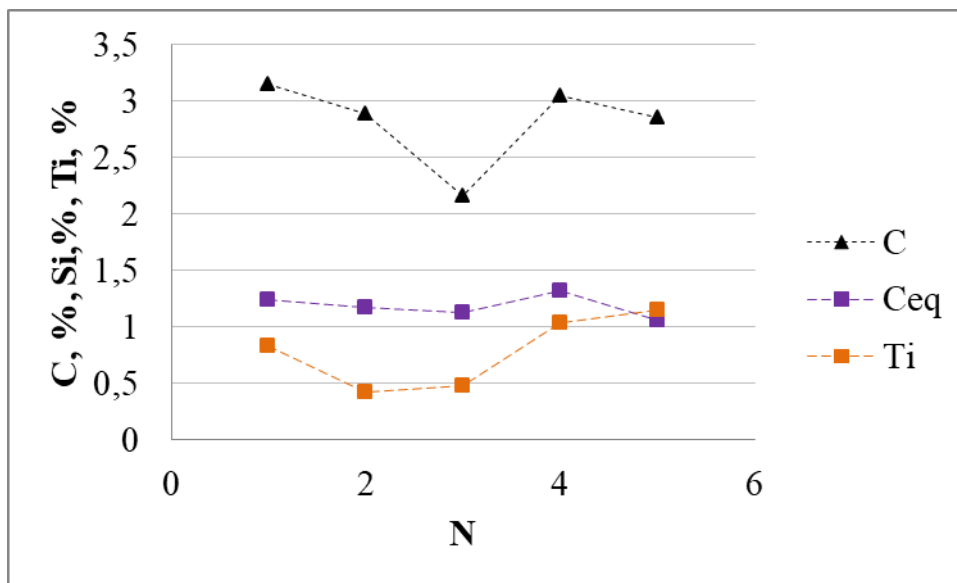


Рисунок 3.15 - Результати хімічного аналізу 5 різних плавів при суміщеному легуванні (Ti+B)

З рис. 3.14 видно, що додаткове легування бором не призводить до збільшення ударної в'язкості. Однак для більш точного встановлення цього факту виконано перевірку гіпотези про рівність значень ударної в'язкості чавуну при легуванні титаном значенням ударної в'язкості чавуну при суміщеному легуванні (Ti+B):

$$H: M(a_n(\text{Ti})) = a_n(\text{Ti+B}) \quad (3.10)$$

Гіпотеза вважалася відкинutoю під час виконання умови:

$$t = \frac{(M(a_n(\text{Ti})) - a_n(\text{Ti+B}))\sqrt{N}}{s(a_n(\text{Ti}))} > t_{cv}, \quad (3.11)$$

де $M(a_n(\text{Ti}))$ – математичне очікування ударної в'язкості, що відповідає розрахунковому на підставі отриманої математичної моделі,

$a_n(\text{Ti+B})$ – значення ударної в'язкості при суміщеному легуванні (Ti+B),

$s(a_n(\text{Ti}))$ – середньоквадратичне відхилення величини ударної в'язкості, отримане при побудові рівняння регресії (3.8),

t_{cv} – середньоквадратичне відхилення величини ударної в'язкості, отримане при побудові рівняння регресії критичне значення розподілу Стюдента,

N – об'єм виборки.

У таблиці 3 наведено результати перевірки гіпотези (3.11)

Таблиця 3.3 - Результати перевірки статистичної гіпотези (3.11)

$a_n(\text{Ti})$	$a_n(\text{Ti+B})$	t	t_{cv}
0,76	0,4	26,823	5,841
0,82	0,6	16,392	
0,88	0,7	13,412	
0,78	0,7	5,961	
0,76	0,6	11,921	

З таблиці 3.3 видно, що гіпотеза відкидається, тобто додаткове легування бором не створює переваг досягнення високої ударної в'язкості порівняно з тими її значеннями, які забезпечує легування титаном.

Рівняння регресії у нормованому вигляді (3.8) та математична модель у явному вигляді (3.9) дозволяють прогнозувати значення ударної в'язкості чавуну, маючи конкретний хімічний склад сплаву. Як свідчать результати перевірки моделі (табл. 3.2, рис. 3.11), вона дає точний прогноз приблизно 92%. Такий результат можна вважати позитивним, оскільки побудова математичних моделей навіть за трьома вхідними змінними при малому обсязі експериментальних даних є проблемною. Це дозволяє використовувати модель для практичної мети.

Аналіз моделі проведенням чисельних експериментів при фіксованих значеннях кожної вхідної змінної на середньому рівні, що виконується послідовно, дозволяє зробити висновок про те, що вуглець і титан впливають на ударну в'язкість протилежно. Збільшення вмісту вуглецю призводить до

збільшення ударної в'язкості, тоді як збільшення вмісту титану зменшує її (рис. 3.12, 3.13). Ймовірно, це пов'язано з процесами карбідоутворення, що залежать від співвідношення C:Ti та з урахуванням того, що вплив титану на процеси графітоутворення є двояким. Вуглецевий еквівалент впливає на ударну в'язкість аналогічно вуглецю, проте меншою мірою. Це означає, що комбінація (0.3Si–0.03Mn) також є фактором впливу на ударну в'язкість (рис. 3.13).

Слід зазначити, що всупереч очікуванням посилення ефекту впливу на ударну в'язкість додаткового легуючого елемента, його додавання не сприяло підвищенню ударної в'язкості (рис. 3.14, 3.15, табл. 3.3). Це дозволяє зробити висновок про недоцільність додаткового легування чавуну бором, заощаджуючи тим самим кошти.

Обмеження дослідження пов'язані з областю варіювання вмісту вуглецю, вуглецевого еквівалента і титану, що використовується. Крім цього, важливо зауважити, що сфера планування експериментів має неправильну форму. Тому оцінка ударної в'язкості за рівнянням (3.8) у нормованому вигляді або рівнянням (3.9) у натуральному вигляді у разі, якщо хімічний склад випадає за інтервали варіювання, може виявитися неадекватною. Виходячи з цього, можливим напрямом подальших досліджень може бути побудова моделі поза розглянутою областю планування експериментів.

Отримана математична модель $a_n = f(C; C_{eq}; Ti)$ має вигляд нелінійного рівняння регресії та забезпечує високу прогнозуючу здатність оцінки ударної в'язкості за вмістом вуглецю, вуглецевим еквівалентом та вмістом титану – 92,3 %. Така прогнозуюча здатність дозволяє говорити про можливість практичного застосування отриманої математичної моделі.

Вуглець та титан по-різному впливають на ударну в'язкість – вона збільшується зі збільшенням вмісту вуглецю, але зменшується зі збільшенням вмісту титану. Дія вуглецевого еквівалента на ударну в'язкість аналогічна дії вуглецю, проте комбінація (0.3Si-0.03Mn) зменшують силу такого впливу.

Додаткове легування чавуну бором не дозволяє підвищити величину ударної в'язкості, тому не є доцільним.

3.3 Визначення впливу ванадію на твердість комплексного Cr-Ni-Ti-Cu чавуну

Об'єктом дослідження у цій частині роботи є чавун із пластинчастим графітом, модифікований двома типами модифікаторів – FeSi75 та FeSi40V7. Метою було визначення впливу ванадію на механічні властивості чавуну, що застосовується для фасонних виливків машинобудівного призначення. Введенням модифікатора FeSi40V7 мала на меті оцінити тенденцію введення ванадію і поведінки при цьому твердості чавуну. Необхідно було при цьому забезпечити ефект комбінованого впливу на структуру елементів, що графітізують (кремнію) разом з карбідоутворюючим (ванадієм).

Серійні плавки проводились у чавуноливарному цеху ВАТ «Кременчуцький завод дорожніх машин» (ВАТ «Кредмаш», Україна), де виготовляються виливки для автомобільної та дорожньої техніки, із чавуну марки СЧ200 ДСТУ 8833:2019.

Плавка проводилася в індукційній печі тигельної ІСТ 1/0.8-М5 (СРСР) з кислою футеровкою (рис. 3.16).

Шихтові матеріали:

- Повернення власного виробництва;
- Бій графітових електродів фракцією 1-10 мм;
- брухт сталевий 1А (Ст3) з максимальним габаритним розміром – 350 мм, товщиною – 3,9 мм, мінімальною масою – 15–18 кг.



Рисунок 3.16 - Процес плавки

Шихта попередньо підігрівалася. Підвантаження шихтових матеріалів виконувалося після осадження шихти в тиглі. Управління процесом здійснювалося з пульта управління. Контроль правильності ведення процесу плавки, стану тигля та ізоляції індуктора виконували за показаннями приладів щита керування.

Шлак наводився присадкою сухого піску, рідинного шлаку забезпечувалася введенням вапна або вапняку фракцією до 30 мм. Доведення розплаву до заданого хімічного складу і температури здійснювалося після повного розплавлення шляхом підігріву розплаву протягом 5 хвилин і відключення печі з витримкою з метою повнішого протікання окислювально-відновних процесів у розплаві.

Температура чавуну перед модифікуванням знаходилася в діапазоні 1400–1450 °С.

Відпрацьовувалося використання двох модифікаторів: FeSi75 (плавки Серії I) и FeSi40V7 (плавки Серії II). В обох випадках фракція становила до

10 мм, кількість модифікатора становила 0,3% від маси рідкого металу, модифікатор вводився до ківша після заповнення його на 100–150 мм. Результати поєднаного модифікування з легуванням феросплавом FeSi40V7 порівнювалися з результатами модифікування FeSi75 з урахуванням коригування вмісту кремнію. Таким чином здійснювалася перевірка впливу на механічні властивості ванадію.

Коригування хімічного складу та доведення його до заданих значень по марганцю, хрому, нікелю виконувалося відповідно: феромарганцем FeMn70, ферохром FeCr100, FeCr200, феронікель FeNi70, відповідно до норм витрати шихтових матеріалів, прийнятих на підприємстві.

У кожній серії проводилося 59 плавок ($N=59$) та визначалася твердість (HB).

Статистична обробка даних здійснювалася за формулами:

$$M(Y) = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i}{N}, \quad (3.12)$$

$$s(Y) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - M(Y))^2}{N-1}}, \quad (3.13)$$

де Y_i – твердість (HB);

$s(Y)$ – середньоквадратичне відхилення значень твердості;

N – число експериментальних точок для розрахунку статистичних характеристик значень твердості чавуну.

Рішення про суттєвість впливу ванадію на механічні властивості та ОПК приймалося на основі перевірки статистичної гіпотези про рівність математичного очікування якості у серії II математичного очікування якості у серії I:

$$H: M(Y_I) = M(Y_{II}), \quad (3.14)$$

де Y_I – значення твердості в серії I;

Y_{II} – значення твердості в серії II;

$M(Y_I)$ – математичне очікування значення твердості у серії I;

$M(Y_{II})$ – математичне очікування значення твердості у серії II.

Гіпотеза вважалася відкинутою під час виконання умови

$$t = \frac{(M(Y_I) - M(Y_{II}))\sqrt{N}}{s(Y)} > t_{cv}, \quad (3.15)$$

де t_{cv} – критичне значення розподілу Стюдента.

У табл. 3.4 наведено результати хімічного складу сплаву у двох серіях плавок – з модифікуванням FeSi75 (серія I) та з модифікуванням FeSi40V7 (серія II).

Таблиця 3.4 - Хімічний склад чавуну

Плавка	Хімічний склад, %						
	C	$C_{\text{экв}}^*$	Cr	Ni	Ti	Cu	V
Серія I	3.12–3.6	3.895– 4.503	0.21– 0.47	0.15– 0.2	0.041– 0.095	0.1– 0.43	–
Серія II	3.35– 3.67	4.05–4.677	0.24– 0.53	0.15– 0.2	0.044– 0.089	0.1– 0.32	0.04– 0.078

Вуглецевий еквівалент розрахований за формулою

$$C_{\text{экв}} = C + 0.3\text{Si} + 0.33\text{P} + 0.4\text{S} - 0.03\text{Mn}. \quad (3.16)$$

Основні технічні характеристики печі приведені в табл. 3.5.

Таблиця 3.5 - Основні технічні характеристики індукційної печі ICT1/0.8 – М5 для виплавки синтетичного чавуну

№ п/п	Технічні характеристики	Нормы
1.	Потужність перетворювача частоти, кВт	800
2.	Потужність номінальна, кВт	823 (+20)
3.	Потужність середньої частоти, кВт	785
4.	Номінальна напруга, В	6000
5.	Номінальна частота струму, Гц – живлячої мережі – контурного ланцюга	50 1000
6.	Число фаз – живлячої мережі – контурного ланцюга	3 1
7.	Номінальна температура перегріву металу, °С	1600
8.	Ємність печі, т	1
9.	Швидкість розплавлення та перегріву, т/год	1.3
10.	Питома витрата електроенергії на плавку та перегрів, кВт*ч/т	633
11.	Витрата охолоджувальної води, м³/год	14.4

Управління процесом плавки в печі ICT1-0.8M5 здійснюється в ручному або напівавтоматичному режимі з шафи управління і полягає у підборі потужності трансформатора та введенні необхідної кількості коригувальних присадок залежно від фактичного стану процесу плавки.

Стан плавки оцінюється результатами вимірювання температури та результатами хімічного аналізу сплаву. Відбір проб визначення хімічного складу проводиться у процесі плавки відповідно до технологічними інструкціями на плавку, затвердженими для підприємства. Управління процесом вважається якісним, якщо значення вмісту кожного елемента хімічного складу потрапляє у заданий діапазон ТУ.

Узагальнений алгоритм процесу індукційної плавки з позначеними технологічними операціями, а також варіантами управління процесом плавки, подано на рис. 3.17 [112].

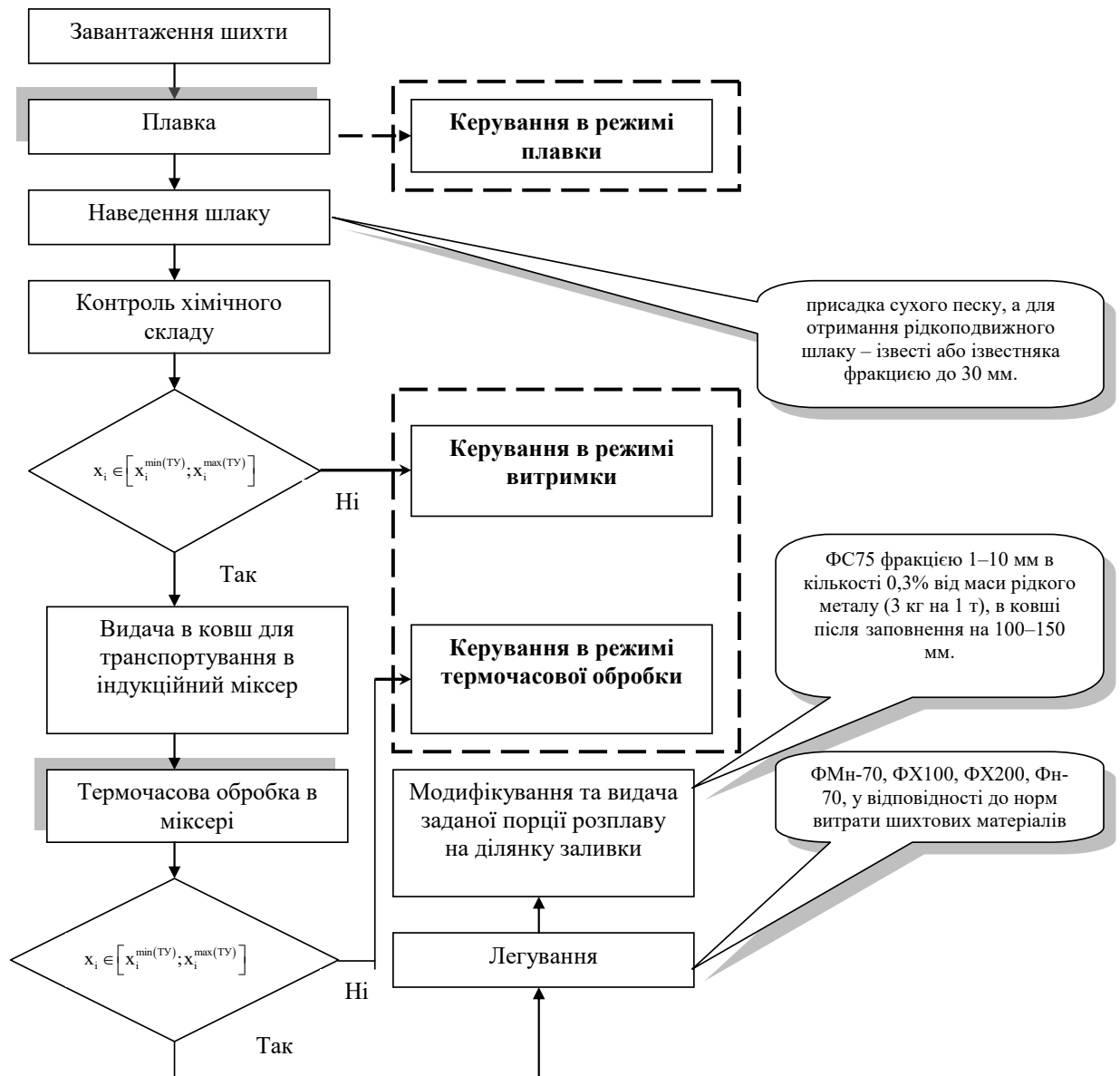


Рисунок 3.17 - Узагальнений алгоритм процесу індукційної плавки

На рис. 3.18 [17] наведено результати визначення НВ.

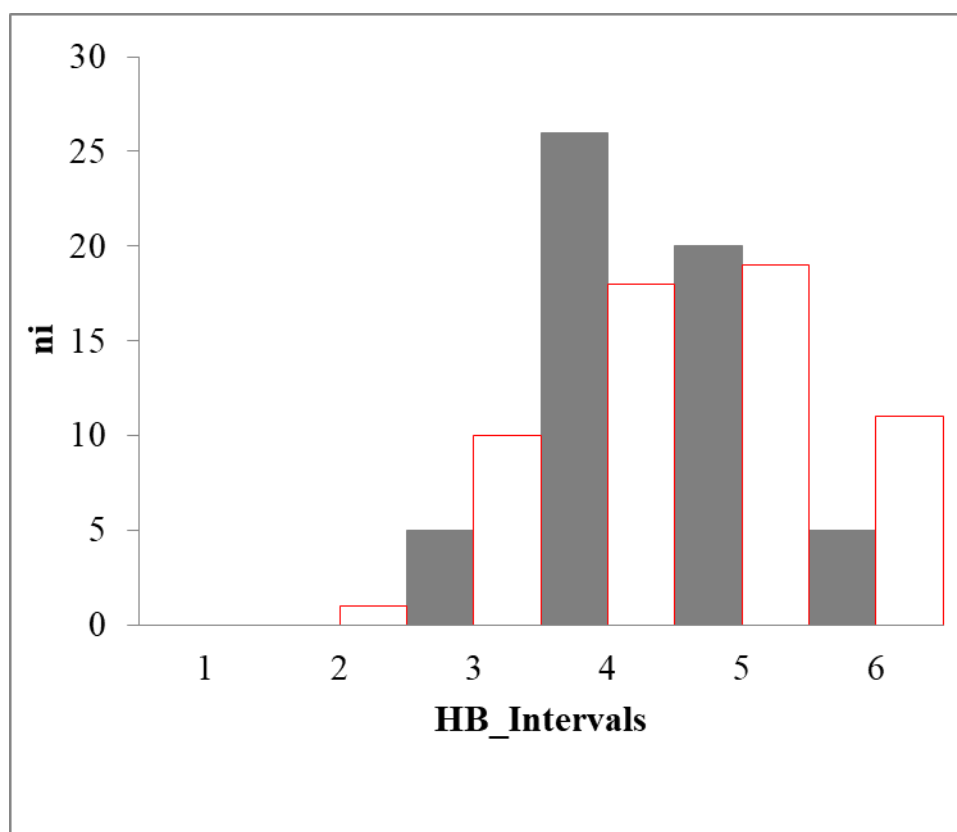


Рисунок 3.18 - Гістограма розподілу твердості (HB):

■ – в серії I; □ – в серії II

Порівняльна характеристика чавуну, в який вводився ванадій, та в якому модифікування здійснювалось лише феросіліцієм, наведена на рис. 3.19 [17].

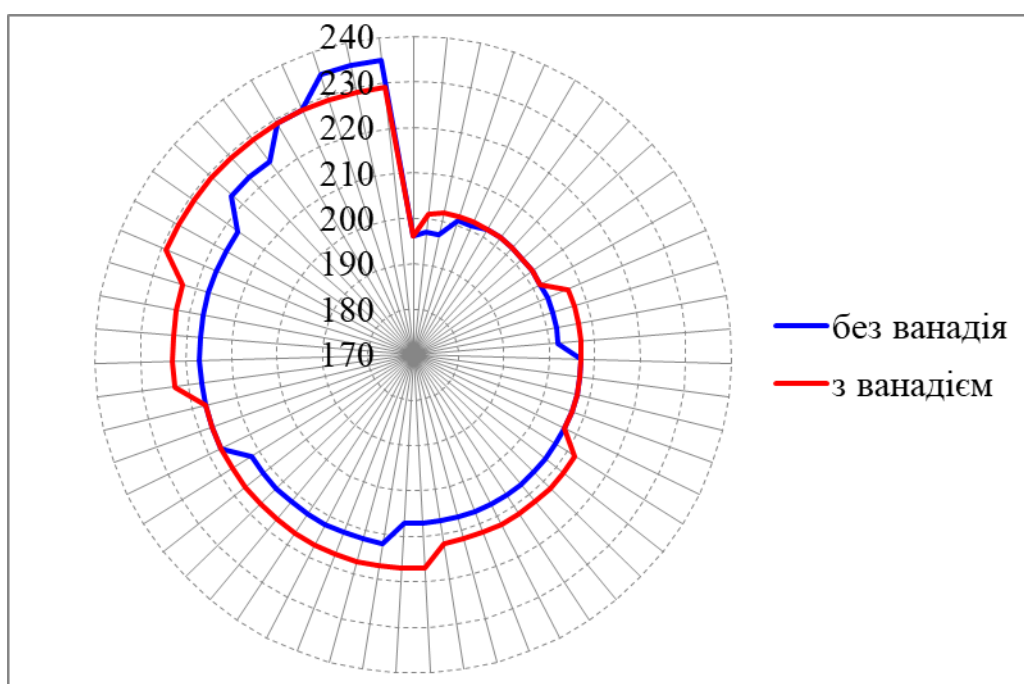


Рисунок 3.19 - Результати експериментально-промислових плавок по НВ

У табл. 3.6 наведено результати розрахунків статистичних характеристик твердості чавуну (НВ) у серії I та серії II.

Таблиця 3.6 - Статистичні характеристики визначення твердості чавуну

Твердість	Серія I		Серія II		
	$M(Y_I)$	$s(Y_I)$	$M(Y_{II})$	$s(Y_{II})$	t
НВ	211	9.4	215	9.5	3.24

Відносно табл. 3.6 варто зауважити, що $t_{cv}=2.66$, $P=0.95$

З даних табл. 3.6 видно, що гіпотеза про рівність математичних очікувань має відкинути, тобто введення ванадію є істотним чинником впливу на твердість.

З рис. 3.18, 3.19 та табл. 3.6 слід визначити, що з підвищенням вмісту ванадію твердість чавуну зростає. Це сильним карбідоутворюючим ефектом ванадію, що відповідає загальноприйнятим уявленням.

Однак результати дослідження впливу ванадію на твердість чавуну обмежені діапазонами варіювання елементів хімічного складу, наведеними в таблиці. 3.4, при виборі таких модифікаторів.

Виходячи з отриманих результатів, становлять інтерес дослідження у напрямі виходу за межі інтервалів варіювання вмісту елементів хімічного складу, розглянутих у цьому дослідженні. Цікавими є також дослідження мікроструктури чавуну з хімічним складом у діапазонах, наведених у табл. 3.4. Результати таких досліджень можуть допомогти у подальшій ідентифікації механізму формування властивостей та керування ними шляхом цілеспрямованого регулювання процесу структуроутворення.

Таким чином, встановлено, що введення ванадію в чавун у складі модифікатора FeSi40V7 приводить до збільшення твердості приблизно на 2% - з HB211 до HB215. Такі кількісні значення не потрапляють всередину похибки, що доведено статистичною перевіркою гіпотези про рівність з ймовірністю $P=0.95$ математичних очікувань твердості чавуну, модифікованого FeSi75 та FeSi40V7. Це означає, що вплив ванадію на HB є суттєвим. Таким чином, використання ванадію у складі FeSi40V7 у межах остаточного вмісту його в чавуні на рівні 0.04–0.078 % може бути доцільним лише за необхідності підвищення твердості чавуну через сприяння карбідоутворенню в процесі кристалізації сплаву.

Якщо визначати вплив ванадію на інші механічні властивості задля пошуку цілеспрямованого варіанту легування чавуну, то, відповідно до даних роботи [17], введення ванадію в чавун у складі модифікатора FeSi40V7 призводить до зменшення межі міцності на 4 %, але до збільшення твердості на 2 %. Суттєвий вплив ванадію з ймовірністю 95 % встановлено також відносно узагальненого показника якості за механічними властивостями – введення ванадію сприяє падінню цього показника приблизно на 5 %.

Ці результати можуть бути корисними для того, щоб виявити можливі варіанти легування задля підвищення зносостійких властивостей чавуну.

Висновки до розділу 3

1. Результати розрахунку оптимального хімічного складу та очікувані оптимальні показники твердості зносостійкого чавуну показали, що максимум твердості становить HRC49 за наступного хімічного складу: $C=3.54\%$, $C_{eq}=3.95\%$, $Ti=3.56\%$. Однак цей оптимальний склад, що забезпечує максимум твердості, знаходиться за межами області планування експерименту, тому даний результат не може бути визнаний за прийнятний, бо потребує розширення області планування експерименту. При цьому отримане поліноміальне рівняння регресії може бути використане для прогнозування твердості тільки в діапазоні варіювання факторів, вибраних згідно з планом пасивного експерименту.

2. Отриманий результат щодо твердості при легуванні низьковуглецевого доєвтектичного чавуну титаном в кількості, що відповідає дослідженій області хімічного складу, може бути пояснений тим, що структура чавуну його складається переважно з продуктів розпаду аустеніту, ледебуриту, включень карбиду титану та цементиту голчастої будови.

3. Аналіз отриманої математичної моделі виду $HRC=f(C; C_{eq}; Ti)$ показав, що вискі значення твердості чавуну можуть бути отримані і всередині розглянутої області планування, причому при вмісті титану поблизу мінімальних значень: $C=3.34\%$, $C_{eq}=3.727\%$, $Ti=0.73\%$. Це свідчить про те, що поверхня відгуку має складний вигляд, що потребує додаткових досліджень, зокрема з урахуванням обмежень на хімічний склад, які накладаються областю планування експерименту.

4. Отримана адекватна математична модель $a_n=f(C; C_{eq}; Ti)$ у вигляді поліноміального рівняння регресії другого ступеню може бути використана для розрахунку очікуваної ударної в'язкості на підставі фактичного хімічного складу сплаву, для визначення доцільності застосування інших легуючих

елементів крім титану, наприклад бору, а також для вибору оптимальних режимів легування. Підставою для цього є результати визначення точності отриманої моделі, яка складає приблизно 92%. Такий результат можна вважати позитивним, оскільки побудова математичних моделей навіть за трьома входними змінними при малому обсязі експериментальних даних є проблемною. Це дозволяє використовувати модель для практичної мети.

5. Визначено, що вуглець і титан впливають на ударну в'язкість протилежно. Збільшення вмісту вуглецю призводить до збільшення ударної в'язкості, тоді як збільшення вмісту титану зменшує її. Ймовірно, це пов'язано з процесами карбідоутворення, що залежать від співвідношення C:Ti та з урахуванням того, що вплив титану на процеси графітоутворення є двояким. Вуглецевий еквівалент впливає на ударну в'язкість аналогічно вуглецю, проте меншою мірою. При цьому додаткове легування чавуну бором не дозволяє підвищити величину ударної в'язкості, тому не є доцільним.

6. Встановлено, що введення ванадію в чавун у складі модифікатора FeSi40V7 приводить до збільшення твердості чавуну приблизно на 2%. Статистичною перевіркою гіпотези про рівність математичних очікувань твердості чавуну, модифікованого FeSi75 та FeSi40V7, доведено з ймовірністю $P=0.9$, що вплив ванадію на твердість є суттєвим. Таким чином, використання ванадію у складі FeSi40V7 у межах остаточного вмісту його в чавуні на рівні 0.04–0.078 % може бути доцільним за необхідності підвищення твердості чавуну через сприяння карбідоутворенню в процесі кристалізації сплаву.

7. Є підстави вважати, що вплив ванадію на інші механічні властивості чавуну задля пошуку цілеспрямованого варіанту легування чавуну, призводить до зменшення межі міцності на 4 %, тому легування чавуну ванадієм має здійснюватися в комбінації з іншими легуючими елементами, наприклад хромом нікелем, та міддю. В такому випадку комплексна дія Ti–V–Cr–Ni–Cu може позитивно впливати на усі механічні властивості чавуу,

зокрема на його твердість та зносостійкість. Для цього має бути визначено припустимі межі значень по кожній механічній властивості, що складуть обмеження для рішення оптимізаційної задачі з критерієм оптимізації по твердості чавуну або коефіцієнту його зносостійкості.

Зміст розділу відображено у таких наукових публікаціях [115], [116], [117].

РОЗДІЛ 4

ОПТИМІЗАЦІЯ ХІМІЧНОГО СКЛАДУ ЗНОСОСТІЙКОГО ЧАВУНУ

4.1 Методика оптимізації хімічного складу чавуну

Для оптимізації хімічного складу зносостійкого чавуну використано два методи: канонічне перетворення поверхні відгуку та гребеневий аналіз [113].

Для канонічного перетворення поверхні відгуку, як методу експериментальної оптимізації хімічного складу чавуну, було використано наступні процедури.

1. Визначення координат стаціонарної точки x^* шляхом вирішення системи лінійних рівнянь:

$$\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1^* \\ \vdots \\ x_n^* \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{pmatrix}. \quad (4.1)$$

2. Обчислення значення цільової величини у стаціонарній точці

$$y^* = a_0 + 2a^T x^* + x^{*T} A x^*. \quad (4.2)$$

3. Визначення n власних значень $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$

$$\begin{vmatrix} a_{11} - \lambda & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} - \lambda & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} - \lambda \end{vmatrix} = (-\lambda)^n + P_1 \lambda^{n-1} + \dots + P_n = 0 \quad (4.3)$$

4. Запис рівняння поверхні відгуку в канонічній формі:

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2 \quad (4.4)$$

Таким чином, в результаті перенесення та повороту осей та переходу від системи координат $(x_1; x_2)$ в систему координат $(\xi_1; \xi_2)$ забезпечується перетворення вихідного рівняння поверхні відгуку

$$y(x) = a_0 + 2a^T x + x^T A x \quad (4.5)$$

до канонічного вигляду

$$y - y^* = \lambda_1 \xi_1^2 + \lambda_2 \xi_2^2 + \dots + \lambda_n \xi_n^2 \quad (4.6)$$

Зв'язок між старою та новою системою координат визначається рівнянням

$$x = x^* + B\xi, \quad (4.7)$$

де B – матриця повороту, $B^T B = I$, а різниця між значеннями вихідної змінної довільної і стаціонарної точки описується рівнянням

$$y(\xi) - y^* = \xi^T L \xi. \quad (4.8)$$

Для гребеневого аналізу, як методу експериментальної оптимізації хімічного складу чавуну, було використано наступні процедури.

1. У координатах вхідних змінних будувалась поверхня відгуку, що є графічним описом впливу вхідних змінних на параметр оптимізації.
2. У цих же координатах будувался умовний циліндр з радіусом r .
3. Лінія перетину поверхні відгуку та поверхні циліндра даного радіусу розгорталася на площину і на ній визначалися точки мінімуму та максимуму.

При цьому процедура пошуку субоптимальних значень описувалась параметрично:

$$\begin{cases} \mathbf{x}^*(\lambda) = (\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{a}, \\ r^*(\lambda) = \sqrt{\mathbf{x}^{*\top} \mathbf{x}^*}, \\ y^*(\lambda) = \mathbf{a}_0 + 2\mathbf{a}^\top \mathbf{x}^* + \mathbf{x}^{*\top} \mathbf{A} \mathbf{x}^*, \end{cases} \quad (4.9)$$

де $\mathbf{x}^*(\lambda)$ – матриця субоптимальних значень вхідних змінних у нормованому вигляді, що залежать від параметра λ ,

$\mathbf{x}^{*\top}(\lambda)$ – транспонована матриця субоптимальних значень вхідних змінних,

$r^*(\lambda)$ – радіус кола, що обмежує область вхідних змінних,

$\mathbf{I}$ – одинична матриця,

$\mathbf{a}_0, \mathbf{a}_1, \mathbf{A}$ – матриці оцінок коефіцієнтів,

$\mathbf{a}^\top$ – транспонована матриця оцінок коефіцієнтів при лінійних членах.

Два останні рівняння описують аналітично гребневі лінії, звідки й назва методу.

Система (4.9) після перетворень дозволяє отримати зручні для практики розрахункові формули:

– для визначення субоптимальних значень вхідних змінних:

$$x_i^* = \frac{a_i}{2\lambda} \quad (4.10)$$

– для визначення радіусу умовного циліндру, що описує обмеження:

$$r = \sqrt{r^2}, \quad r^2 = \sum_{i=1}^n \left(\frac{a_i}{2\lambda} \right)^2 \quad (4.11)$$

– для визначення оптимального значення вихідної змінної

$$y^* = a_0 + \sum_{i=1}^n \frac{a_i^2}{2\lambda} \quad (4.12)$$

4.2 Оптимізація складу зносостійкого чавуну за критеріями твердості та коефіцієнту зносостійкості

Для оптимізації обрано математичну модель (3.3), яка при фіксації на постійному нульовому рівні змінної x_2 , тобто при прийнятті умови $x_2=0$ (в нормованому вигляді), набуває вигляду

$$HRC = 46.586 + 5.582x_1 + 0.809x_3 - 22.761x_1^2 + 0.516x_3^2 - 0.748x_1x_3, \quad (4.13)$$

Реалізацією процедури (4.1)–(4.8) отримано такі результати:

$$\lambda_1 = -22.7671, \lambda_2 = 0.522177, y^* = 46.7.$$

Таке значення вихідної змінної у стаціонарній точці відповідає наступним дійсним значенням вхідних змінних: $C = 2.85 \%$, $Ti = 0.7 \%$.

Отже, рівняння, що описує поверхню відгуку в канонічній формі, має вигляд:

$$HRC - 46.7 = -22.7671\xi_1^2 + 0.522177\xi_2^2, \quad (4.14)$$

Оскільки співвідношення власних чисел за величиною та знаком визначають вид поверхні відгуку та $|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 < 0, \lambda_2 > 0$, поверхня відгуку є гіперболічний параболоїд. Фрагмент цього параболоїду, обмежений областю планування (рис. 3.1, 3.5), показано на рис. 4.1.

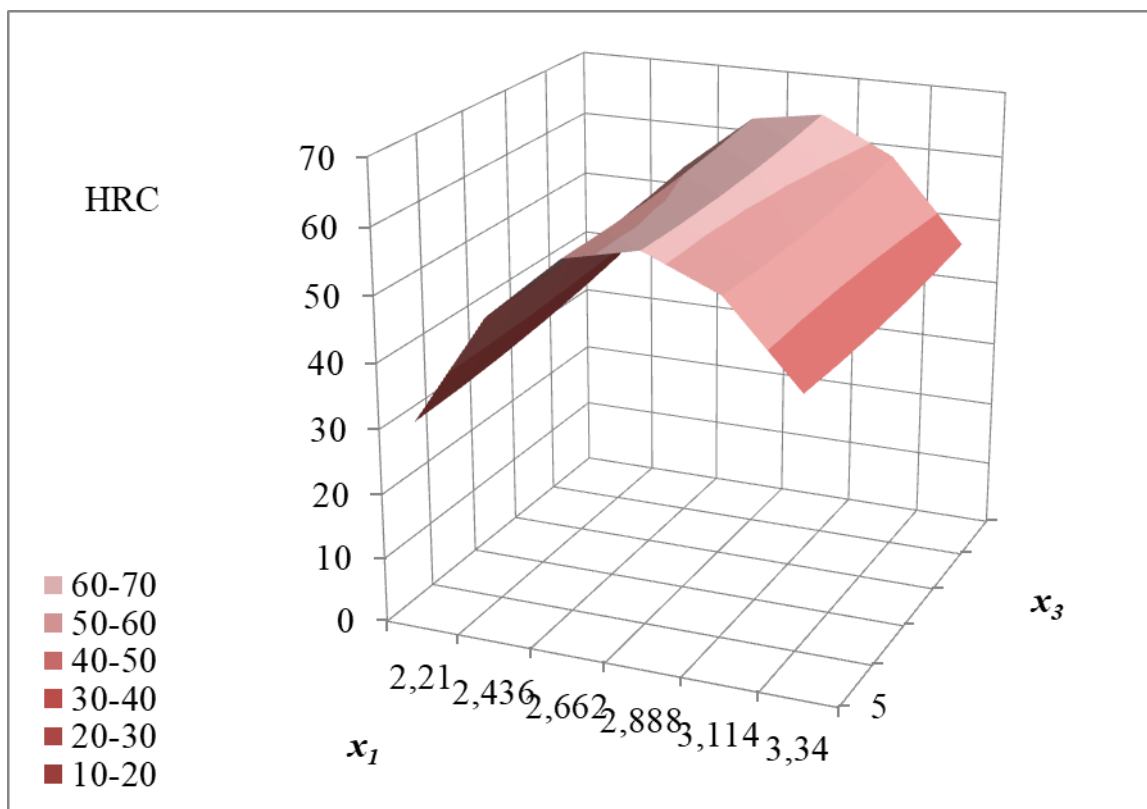


Рисунок 4.1 - Поверхня відгуку в натуральному вигляді

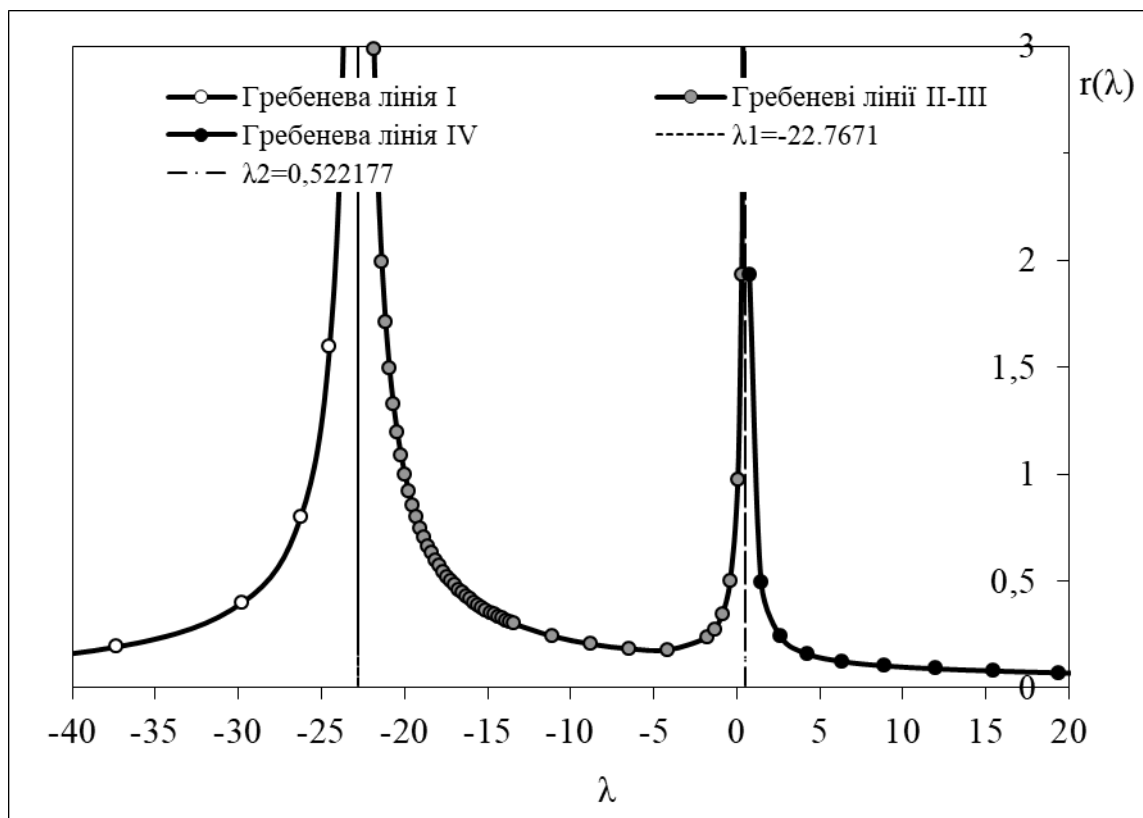
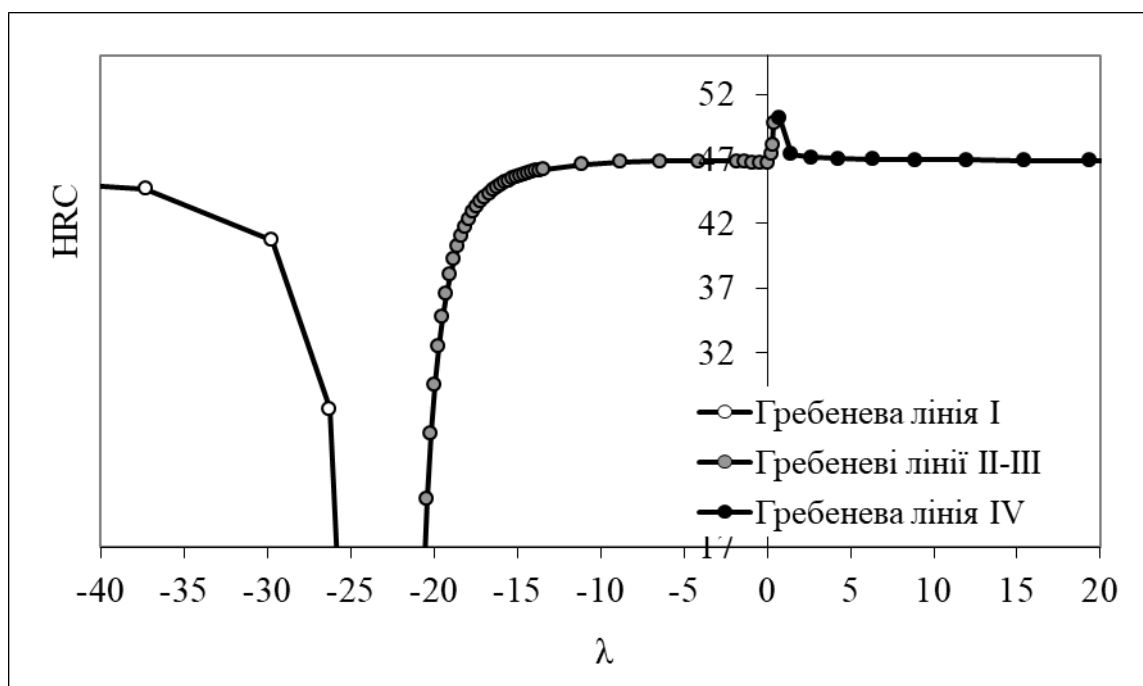
$HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, обмежена областю планування експерименту

На рис. 4.2, 4.3 представлено графічне рішення другого та третього рівнянь системи (4.9) в задачі гребеневого аналізу отриманої поверхні відгуку $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, аналітично описуваного рівнянням регресії виду (4.11).

Коефіцієнти математичної моделі $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ в матричному вигляді, що відповідає третьому рівнянню в системі (4.9), наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 - Коефіцієнти моделі $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$

a_0	Розраховані значенні коефіцієнтів моделі		
	a	A	
46.58609	2.790949	-22.7611	-0.374
	0.404577	-0.374	0.516169

Рисунок 4.2 - $r=r(\lambda)$ Рисунок 4.3 - $HRC=HRC(\lambda)$

Як видно з рис. 4.2, існує два полюси, відповідно до значень параметрів $\lambda_1=-22.7671$, $\lambda_2=0.522177$, що розділяють усю область значень $r(\lambda)$ на 4 підобласті, що відповідають чотирьом гребневим лініям:

– гребенева лінія I: $\lambda =]-\infty; -22,7671[$,

- гребеневі лінії II–III: $\lambda =]-22,7671; 0.522177[$,
- гребенева лінія IV: $\lambda =]0.522177; +\infty[$.

Це дозволяє проаналізувати поведінку твердості у всій області значень λ .

Як впливає з рис. 4.3, в області значень $\lambda =]-\infty; -22,7671[$ твердість є спадаючою функцією з точкою максимуму в області нижніх значень параметру λ .

Гребеневі лінії II–III демонструють наявність трьох характерних зон поведінки твердості:

- в діапазоні $\lambda < -15$ твердість різко росте, досягаючи свого стаціонарного значення *HRC*47,
- в діапазоні $\lambda = [-15; 0]$ твердість не змінюється,
- в діапазоні $\lambda > 15$ твердість знов стрімко зростає.

Гребенева лінія IV демонструє падіння твердості, причому при досягненні значення $\lambda \approx 2$ значення твердості не змінюється.

Залежність *HRC* від радіуса $r(\lambda)$, описуючого обмеження, що накладаються на діапазон значень вхідних змінних областю планування, має вигляд, представлений на рис. 4.4.

З отриманих результатів гребеневого аналізу можна зробити практичні висновки.

Якщо за обмеження, що накладається, обрати діапазон області планування $C = (2.21-3.34)\%$ та $C_{eq} = 3.183\%$, $Ti = (0.28-2.94)\%$ (в нормованому вигляді $[-1; 1]$), що відповідає значенню $r = \sqrt{2} = 1,414$, то можливе існування кількох субоптимальних рішень. Вони визначаються як точки перетину гребневих ліній та обмеження $r = 1,414$ та складають *HRC*47...*HRC*49 на гребневих лініях I та IV відповідно.

Що стосується верхньої гілки гребневої лінії II–III, то значення твердості чавуну на обмеженні $r = 1,414$ може бути таким самим, як і у гребневої лінії I, однак характер залежності $HRC = HRC(r)$ всередині діапазону $r = (0; 1,414)$ інший і демонструє наявність точки мінімуму. Однак,

зважаючи на не виражений явно мінімум, можна вважати значення твердості чавуну в цьому діапазоні за сталий.

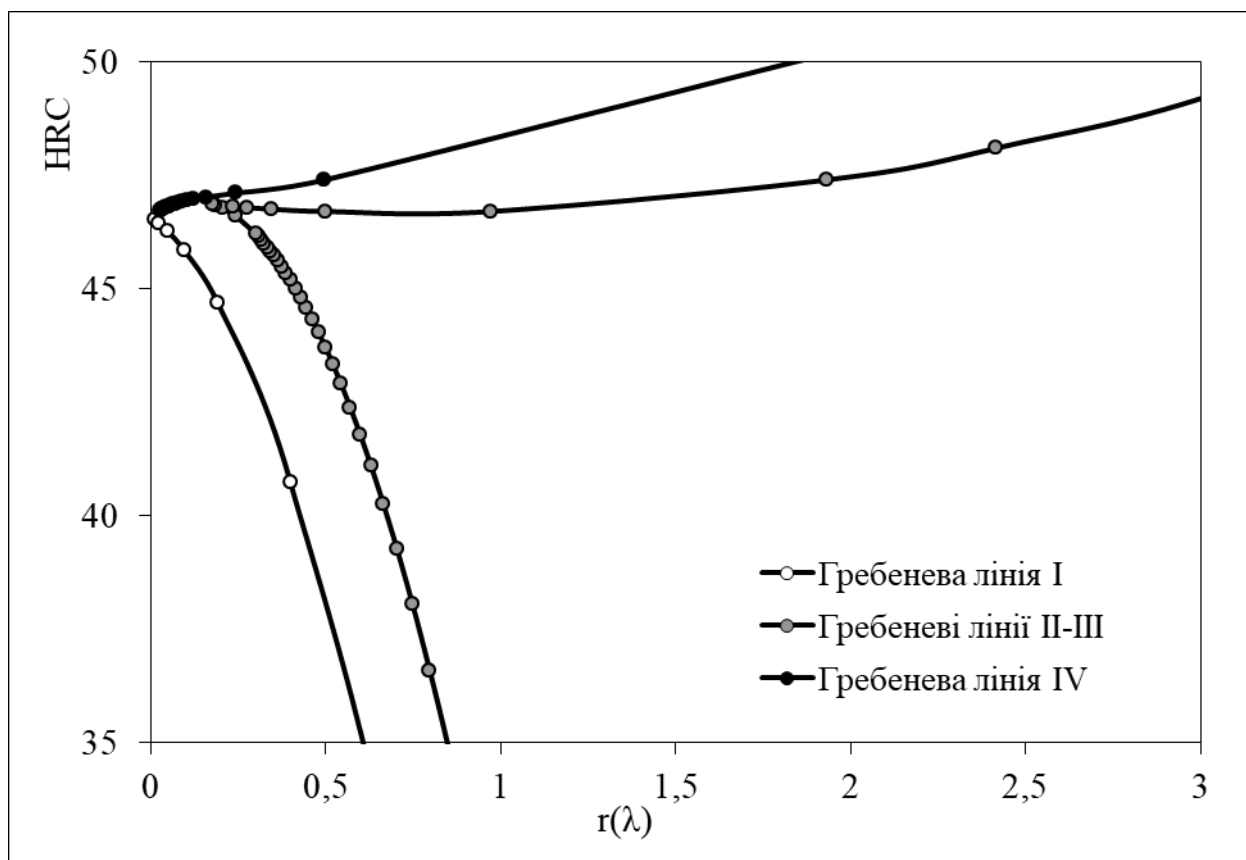


Рисунок 4.4 - $HRC=HRC(r)$

Для оптимізації коефіцієнту зносостійкості обрано математичну модель (2.9), яка при фіксації на постійному нульовому рівні змінної x_2 , тобто при прийнятті умови $x_2=0$ (в нормованому вигляді), набуває вигляду

$$K_{wr} = 12.08145 + 1.917424x_1 - 0.39929x_3 - 13.2789x_1^2 - 3.20145x_3^2 + 4.497585x_1x_3. \quad (4.15)$$

Реалізацією процедури (4.1)–(4.8) отримано такі результати:

$$\lambda_1 = -13,758, \lambda_2 = -2,7224, y^* = 12,15$$

Таке значення вихідної змінної у стаціонарній точці відповідає наступним дійсним значенням вхідних змінних: $C = 2.81 \%$, $Ti = 1.59 \%$.

Отже, рівняння, що описує поверхню відгуку в канонічній формі, має вигляд:

$$K_{wr} - 12.5 = -13.758\xi_1^2 - 2.7224\xi_2^2, \quad (4.16)$$

Оскільки співвідношення власних чисел за величиною та знаком визначають вид поверхні відгуку та $|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 < 0, \lambda_2 < 0$, поверхня відгуку є еліпсоїд. Фрагмент цього еліпсоїду, обмежений областю планування (рис. 3.1, 3.5), показано на рис. 4.5.

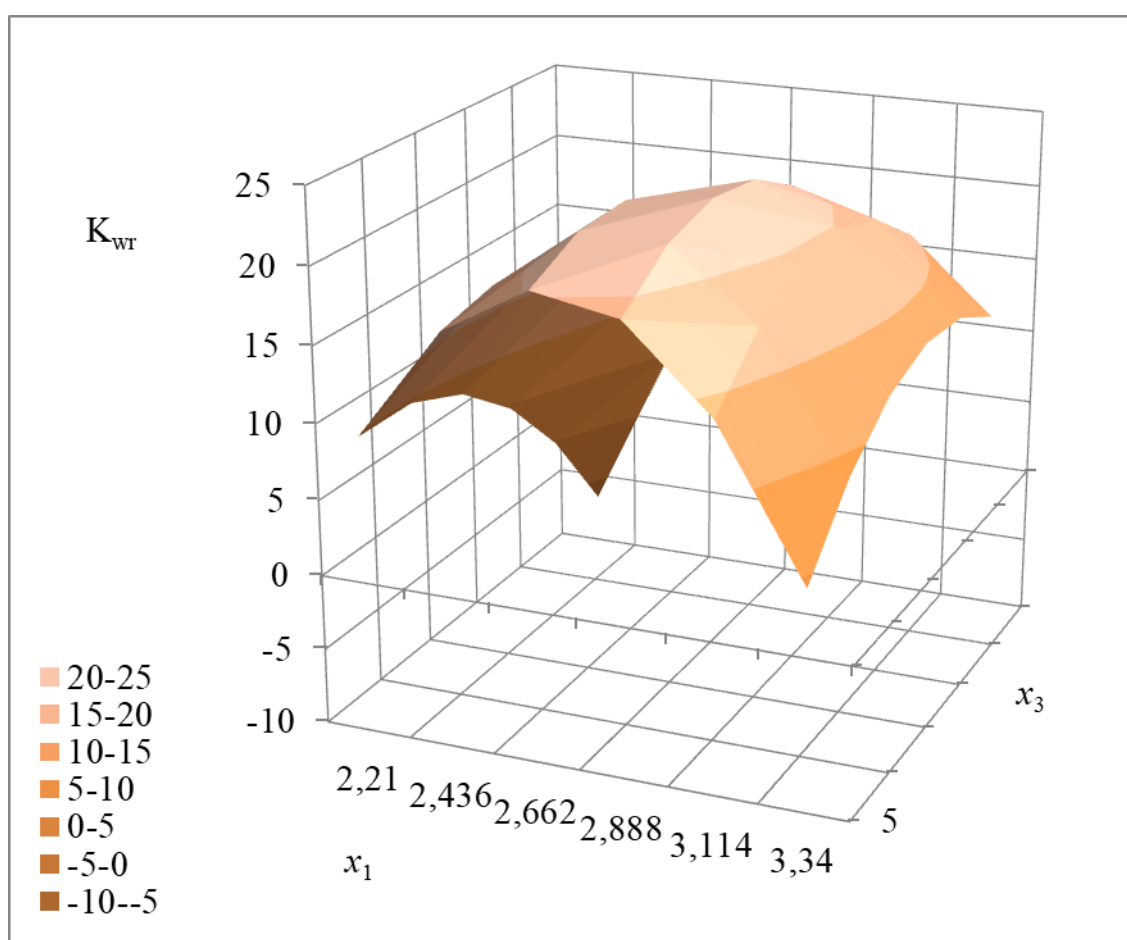


Рисунок 4.5 - Поверхня відгуку в натуральному вигляді

$K_{wr} = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, обмежена областю планування експерименту

На рис. 4.6, 4.7 представлено графічне рішення другого та третього рівнянь системи (4.9) в задачі гребеневого аналізу отриманої поверхні

відгуку $K_{wr} = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, аналітично описуваного рівнянням регресії виду (4.15).

Коефіцієнти математичної моделі $K_{wr} = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ в матричному вигляді, що відповідає третьому рівнянню в системі (4.9), наведено в табл. 4.2.

Таблиця 4.2 - Коефіцієнти моделі $K_{wr} = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$

Розраховані значенні коефіцієнтів моделі			
a_0	a	A	
12,08145	0,958712	-13,2789	2,2488
	-0,19965	2,2488	-3,20145

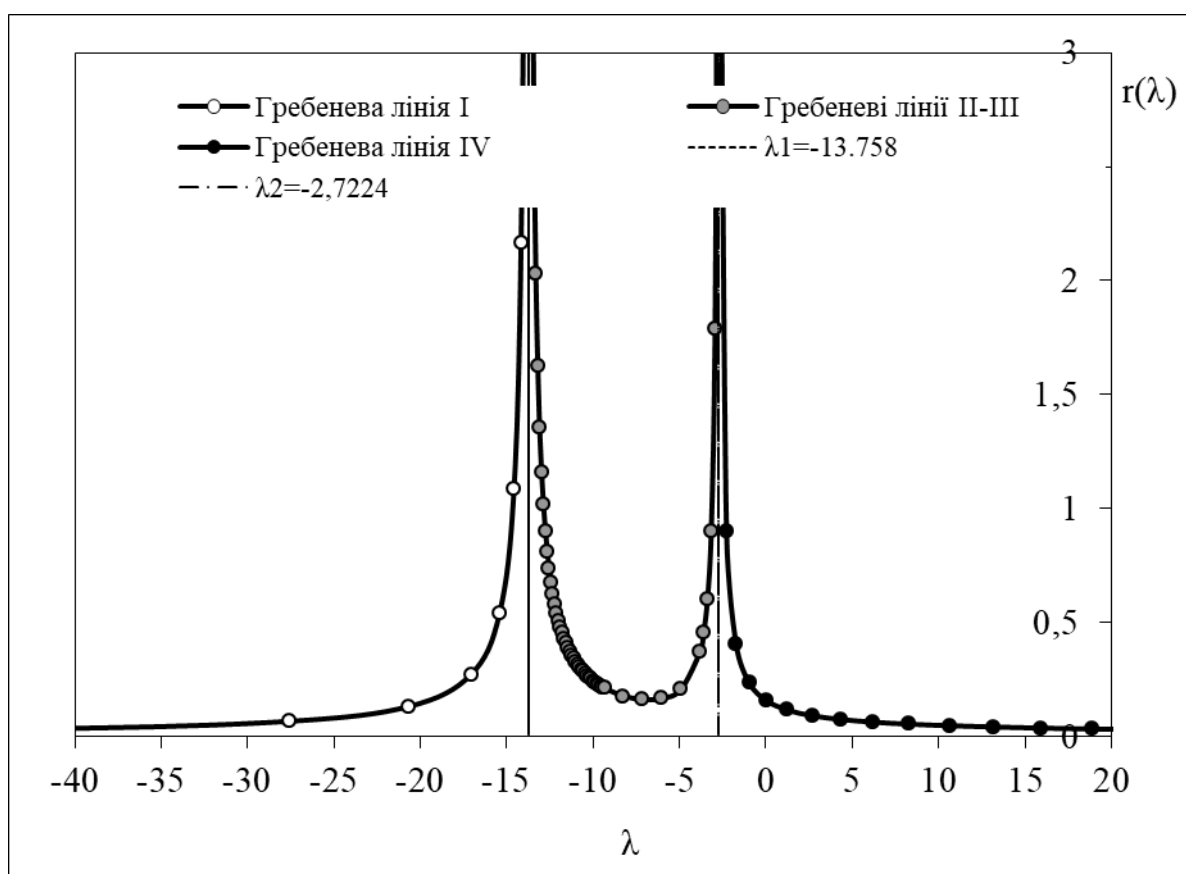


Рисунок 4.6 - $r=r(\lambda)$

Як видно з рис. 4.6, існує два полюси, відповідно до значень параметрів $\lambda_1=-13,758$, $\lambda_2=-2,7224$, що розділяють усю область значень $r(\lambda)$ на 4 підобласті, що відповідають чотирьом гребневим лініям:

- гребенева лінія I: $\lambda =]-\infty; -13,758[$,
- гребеневі лінії II–III: $\lambda =]-13,758; -2,7224[$,
- гребенева лінія IV: $\lambda =]-2,7224; +\infty[$.

Це дозволяє проаналізувати поведінку коефіцієнта зносостійкості у всій області значень λ .

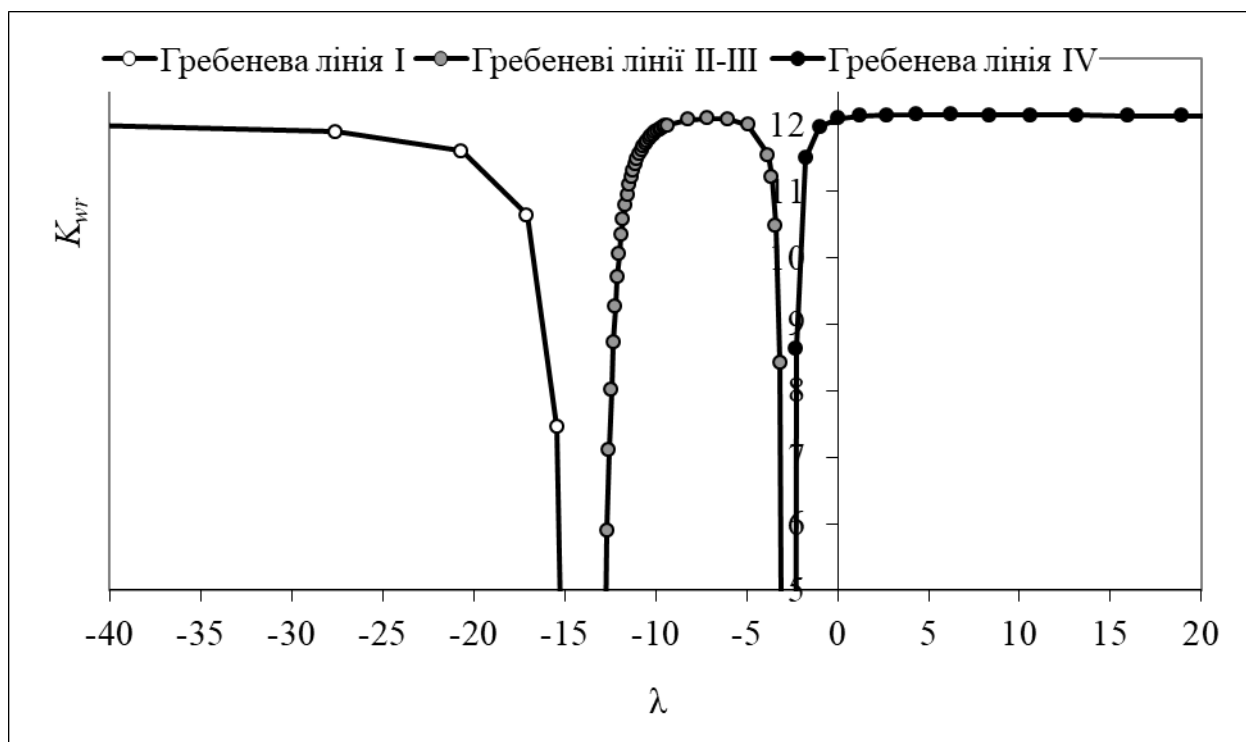


Рисунок 4.7 - $K_{wr}=K_{wr}(\lambda)$

Як впливає з рис. 4.7, в області значень $\lambda =]-\infty; -13,758[$ коефіцієнт зносостійкості до значення параметру $\lambda \approx 20$ є сталою величиною, а після цього значення λ є спадаючою функцією.

Гребеневі лінії II–III демонструють наявність трьох характерних зон поведінки коефіцієнту зносостійкості:

- в діапазоні $\lambda = [-13; -8]$ коефіцієнт зносостійкості різко росте, досягаючи свого стаціонарного значення $K_{wr}=12$,
- в діапазоні $\lambda = [-8; -5]$ коефіцієнт зносостійкості не змінюється,
- в діапазоні $\lambda > -5$ значення коефіцієнту зносостійкості стрімко падає.

Гребенева лінія IV демонструє ріст коефіцієнту зносостійкості в діапазоні $\lambda = [-3; 0]$, причому при досягненні значення $\lambda \approx 0$ значення

коефіцієнта зносостійкості не змінюється та тримається на максимально високому рівні $K_{wr} \approx 12$.

Залежність K_{wr} від радіуса $r(\lambda)$, описуючого обмеження, що накладаються на діапазон значень вхідних змінних областю планування, має вигляд, представлений на рис. 4.8.

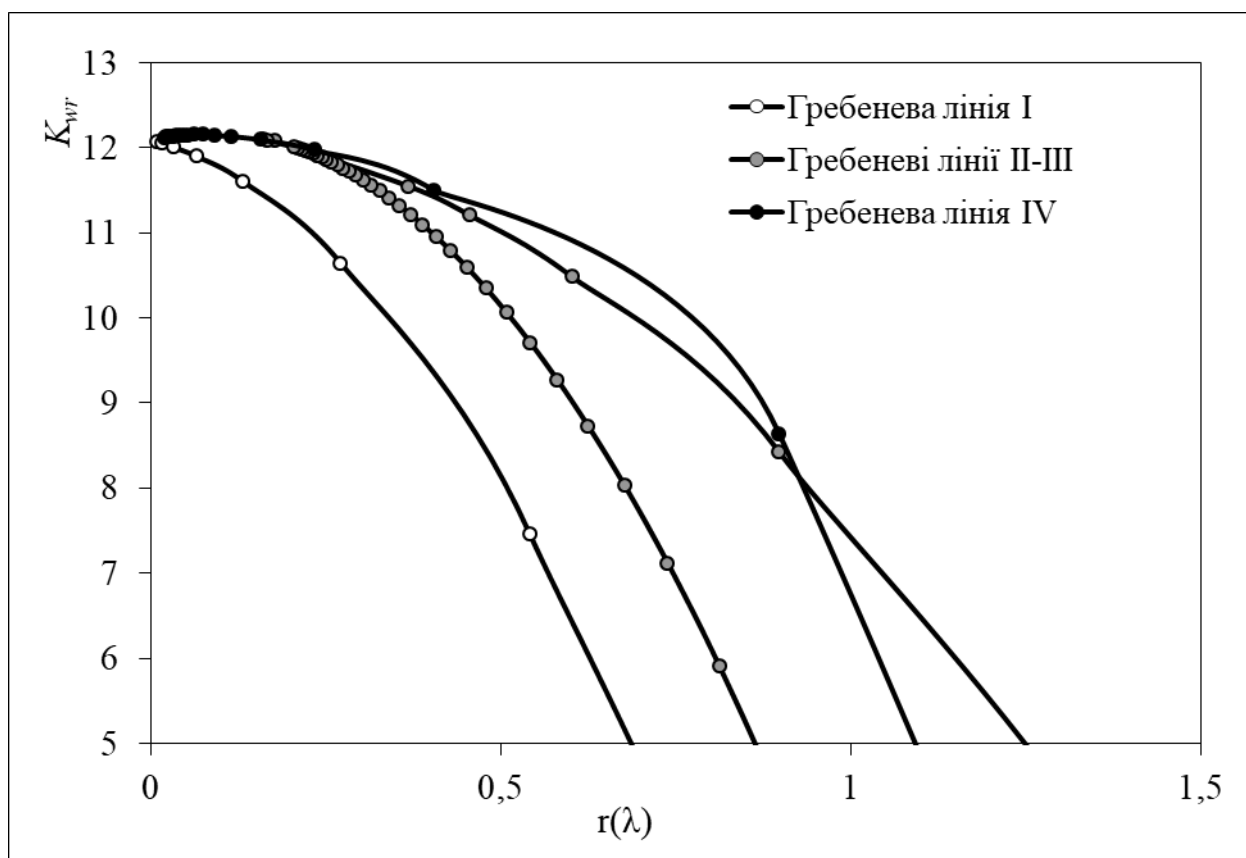


Рисунок 4.8 - $K_{wr}=K_{wr}(r)$

З отриманих результатів гребеневого аналізу можна зробити практичні висновки.

Якщо за обмеження, що накладається, обрати діапазон області планування $C=(2.21-3.34)\%$ та $C_{eq}=3.183\%$, $Ti=(0.28-2.94)\%$ (в нормованому вигляді $[-1;1]$), що відповідає значенню $r = \sqrt{2} = 1,414$, то можливе існування кількох субоптимальних рішень. Однак вони визначаються не як точки перетину гребневих ліній та обмеження $r=1,414$, а знаходяться всередині області $r=(0;1,414)$. При цьому максимум коефіцієнту зносостійкості не залежить від гребеневої лінії та відповідає значенню r близькому до $r=0$.

4.3 Оптимізація складу зносостійкого чавуну за критеріями межі міцності та ударної в'язкості

Для оптимізації межі міцності на розтяг (σ_b) обрано математичну модель (2.8), яка при фіксації на постійному нульовому рівні змінної x_2 , тобто при прийнятті умови $x_2=0$ (в нормованому вигляді), набуває вигляду

$$\sigma_b = 365.0805 + 565.9379x_1 - 20.5485x_3 - 3318.2x_1^2 - 50.0652x_3^2 + 100.7474x_1x_3, \quad (4.17)$$

Реалізацією процедури (4.1)–(4.8) отримано такі результати:

$$\lambda_1 = -3318.98, \lambda_2 = -49.2889, \sigma_b^* = 390 \text{ МПа}$$

Такі значення вихідної змінної у стаціонарній точці відповідає наступним нормованим та дійсним значенням вхідних змінних:

– нормовані значення $x_1=0.083437$, $x_3=-0.12127$.

– натуральні значення: $C = 2.82 \%$, $Ti = 1.45 \%$.

Такі значення вхідних змінних, що забезпечують екстремум функції (4.17) знаходяться на радіусі $r = 0.148$.

Отже, рівняння, що описує поверхню відгуку в канонічній формі, має вигляд:

$$\sigma_b - 390 = -3318.98\xi_1^2 - 49.2889\xi_2^2, \quad (4.18)$$

Оскільки співвідношення власних чисел за величиною та знаком визначають вид поверхні відгуку та $|\lambda_1| \neq |\lambda_2|$, $\lambda_1 < 0$, $\lambda_2 < 0$, поверхня відгуку є еліпсоїд. Виходячи з того, що обидві значення параметру λ є негативними, екстремум функції є точка максимуму. Фрагмент цього еліпсоїду показано на рис. 4.9.

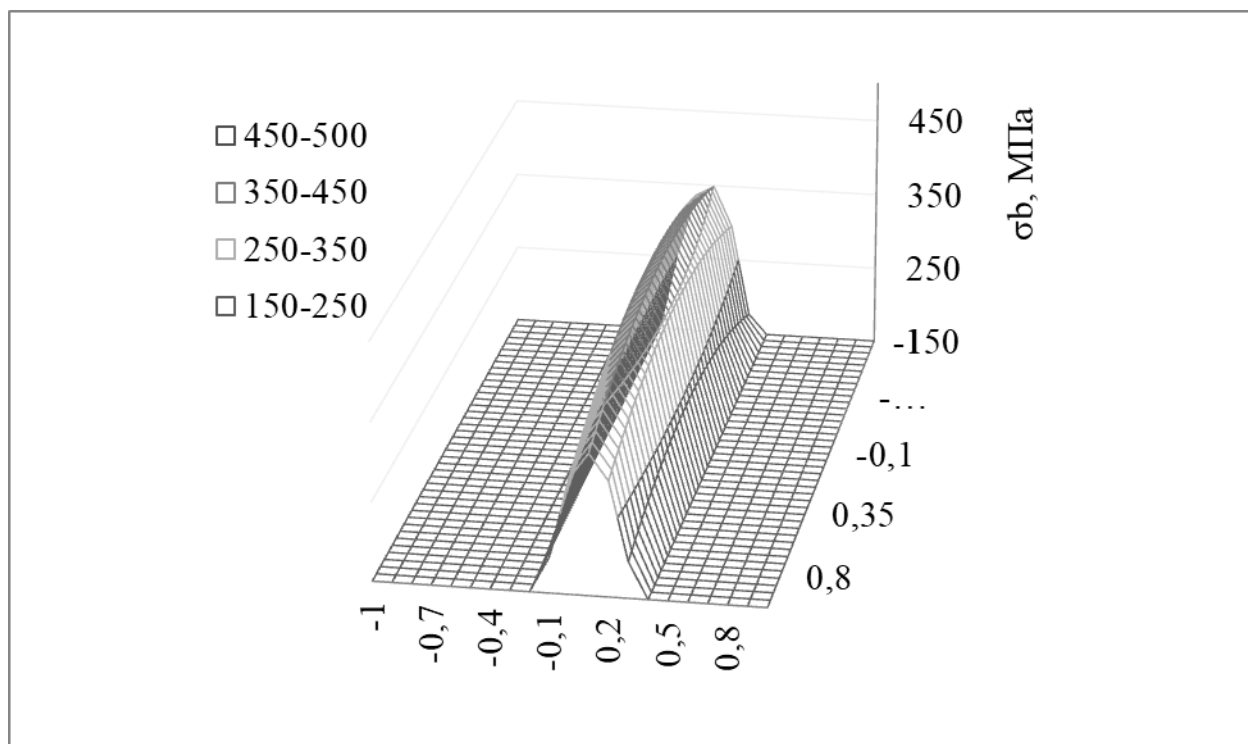


Рисунок 4.9 - Поверхня відгуку в нормованому вигляді $\sigma_b = f(x_1; x_2=0; x_3)$, обмежена областю планування експерименту

На рис. 4.9 найближча вісь на площині вхідних змінних демонструє шкалу вхідної змінної x_1 , а права вісь – змінну x_3 .

З рис. 4.9 випливає чотири важливих висновку:

- найбільш суттєвим фактором впливу на межу міцності на розтяг чавуну є вміст вуглецю,
- вміст титану не впливає значною мірою на межу міцності на розтяг чавуну,
- вплив вмісту вуглецю на межу міцності на розтяг чавуну має яскраво виражений максимум, що припадає на 2.82 % (в нормованому вигляді дорівнює значенню 0.083),
- висновок щодо адекватності моделі та впливу вмісту вуглецю на межу міцності на розтяг чавуну може бути зроблено лише за вузького діапазону варіювання вмісту вуглецю – близько $x_1 = (-0.3; 0.3)$.

На рис. 4.10, 4.11 представлено графічне рішення другого та третього рівнянь системи (4.9) в задачі гребеневого аналізу отриманої поверхні відгуку $\sigma_b = f(x_1; x_2=0; x_3)$, аналітично описуваного рівнянням регресії виду (4.17).

Коефіцієнти математичної моделі $\sigma_b = f(x_1; x_2=0; x_3)$ в матричному вигляді, що відповідає третьому рівнянню в системі (4.9), наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3 - Коефіцієнти моделі $\sigma_b = f(x_1; x_2=0; x_3)$

Розраховані значенні коефіцієнтів моделі			
a_0	a	A	
365,0805	282,969	-3318,2	50,3737
	-10,2743	50,3737	-50,0652

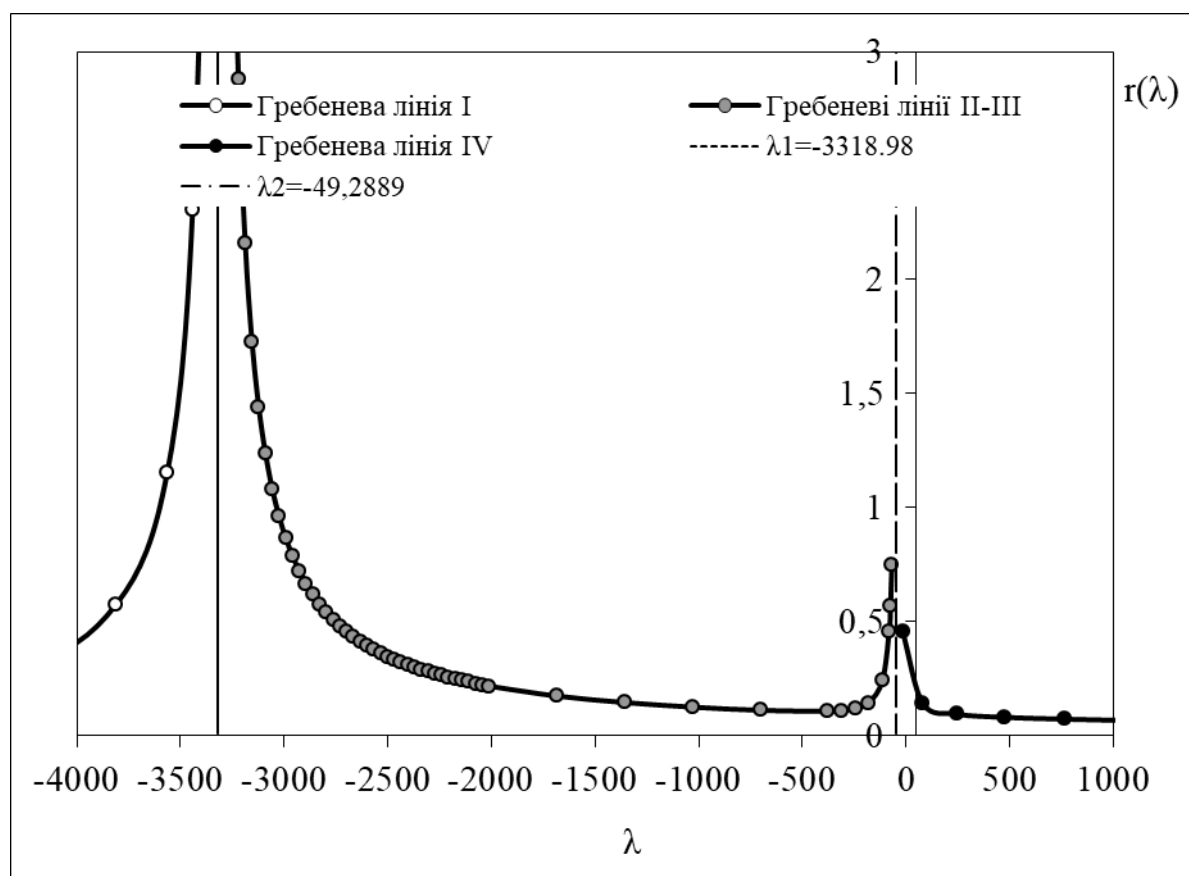


Рисунок 4.10 - $r=r(\lambda)$

Як видно з рис. 4.10, існує два полюси, відповідно до значень параметрів $\lambda_1 = -3318.98$, $\lambda_2 = -49.2889$, що розділяють усю область значень $r(\lambda)$ на 4 підобласті, що відповідають чотирьом гребневим лініям:

- гребенева лінія I: $\lambda =]-\infty; -3318.98[$,
- гребеневі лінії II–III: $\lambda =]-3318.98; -49.2889[$,
- гребенева лінія IV: $\lambda =]-49.2889; +\infty[$.

Це дозволяє проаналізувати поведінку межі міцності на розтяг у всій області значень λ .

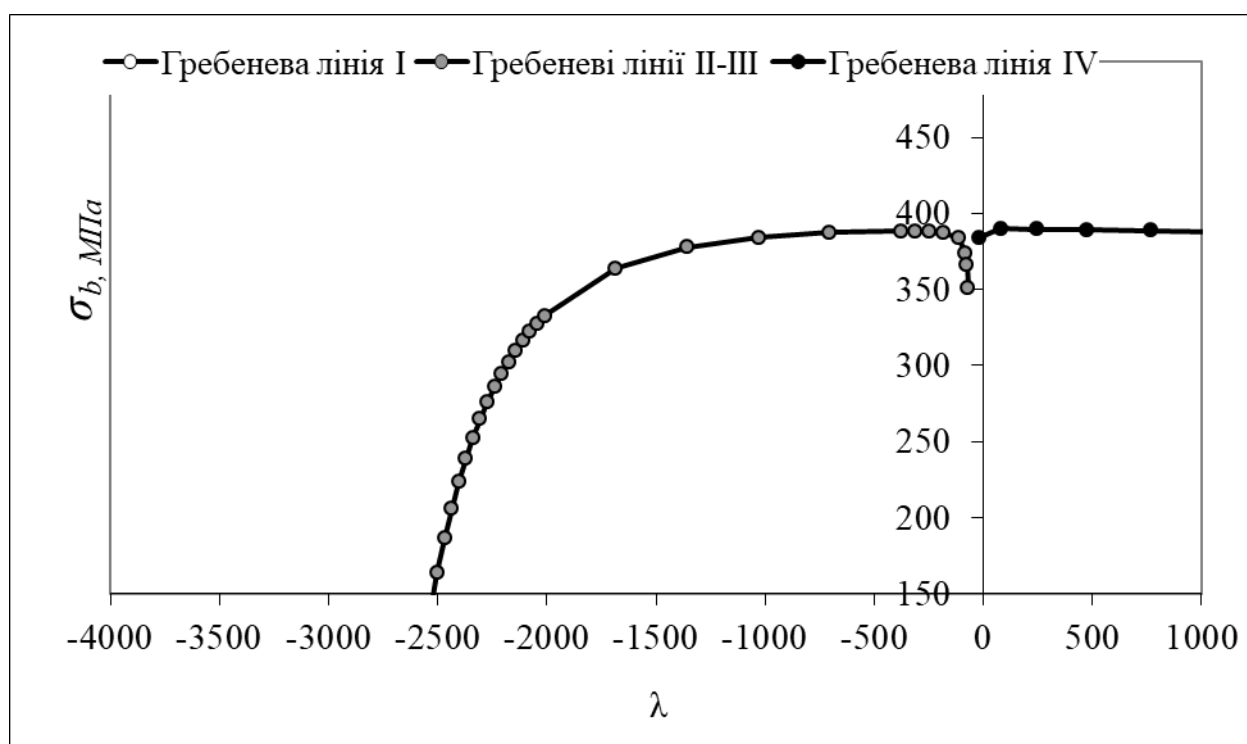


Рисунок 4.11 - $\sigma_b = \sigma_b(\lambda)$

Як впливає з рис. 4.11, в області значень від $\lambda = -2500$ величина межі міцності на розтяг зростає, але при досягненні значення параметру $\lambda \approx -1300$ і далі до діапазону $\lambda \approx [-1300; -100]$ є сталою величиною. Після цього в діапазоні $\lambda \approx [-100; -49.2889[$ величина межі міцності на розтяг стрімко спадає. Ця тенденція характерна для гребневих ліній II–III.

Гребенева лінія IV демонструє, що в діапазоні $\lambda =]-49.2889; +\infty[$ межа міцності на розтяг є сталою величиною.

Залежність σ_b від радіуса $r(\lambda)$, описуючого обмеження, що накладаються на діапазон значень вхідних змінних областю планування, має вигляд, представлений на рис. 4.12.

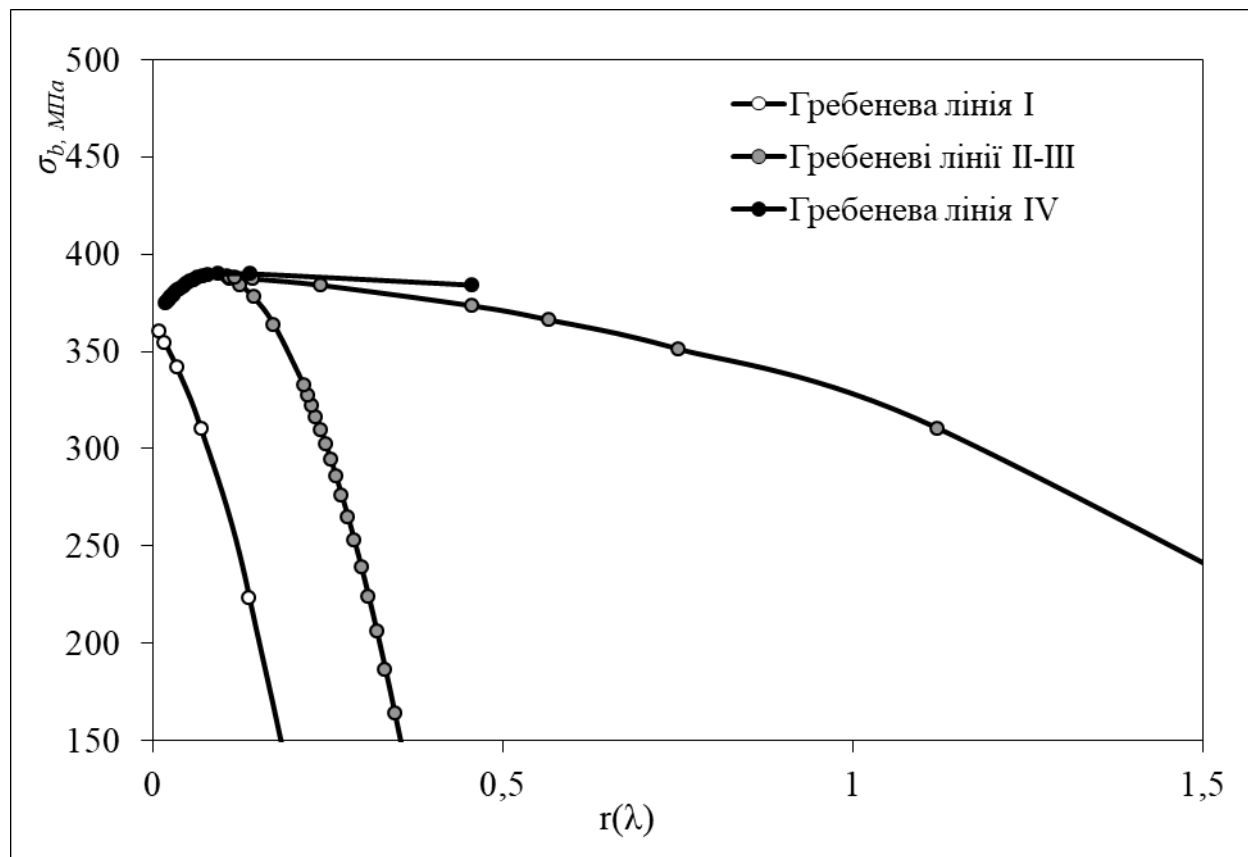


Рисунок 4.12 - $\sigma_b = \sigma_b(r)$

Як видно з рис. 4.12, максимум межі міцності на розтяг досягається на гребеневій лінії IV і він досягає 390 МПа. При цьому, як було визначено в результатах канонічного перетворення поверхні відгуку, оптимальні значення вмісту вуглецю та титану становлять 2.82 % та 1.45 % відповідно. Зазначений максимум знаходиться на радіусі $r=0.148$, що видно безпосередньо з рис. 4.12.

Варто зазначити, що близькі до максимуму значення межі міцності на розтяг знаходяться на гребневих лініях II–III, але на більшій віддаленості від центру плану експерименту (табл. 2.2), $r \approx 0.2$. Це дає можливість вибору інших комбінації значень вмісту вуглецю та титану, які забезпечують близькі до максимуму значення межі міцності на розтяг.

Подальше віддалення від центру плану приводить до падіння величини межі міцності на розтяг, причому таке падіння є більш стрімким на гребеневій лінії III і на межі повного плану експерименту, тобто за виконання умови $r=1.414$ значення межі міцності не буде перевищувати $\sigma_b \approx 260$ МПа.

Що стосується поведінки межі міцності на гребеневій лінії I, то її величина стрімко спадає при віддаленні від центру плану експерименту. При цьому максимальне значення не перевищує $\sigma_b \approx 360$ МПа майже в центрі плану.

З отриманих результатів гребеневого аналізу можна зробити наступні висновки. Якщо розглядати поведінку межі міцності всередині області планування $C=(2.21-3.34)\%$ $Ti=(0.28-2.94)\%$ за постійного значення $C_{eq}=3.183\%$, (в нормованому вигляді $[-1;0;1]$), то можливе існування кількох субоптимальних рішень. Вони знаходяться майже всередині області планування, при цьому максимум значень межі міцності знаходиться переважно на гребневих лініях I, II–III, причому близько до $r=0$. Зміна величини C_{eq} в розглянутому діапазоні варіювання буде приводити до того, що усі рішення будуть зміщатися, в залежності від того, чи буде зменшуватись або збільшуватись величина вуглецевого еквіваленту. Остання, відповідно до формули (2.1) за сталого вмісту вуглецю може коригуватись вмістом кремнію та марганцю.

Це означає, що найкращий хімічний склад при виборі за критерій оптимізації межі міцності на розтяг може бути обраний не лише з міркувань забезпечення максимуму цієї вихідної змінної, але й з економічних міркувань. Реалізується така можливість через розрахунки витрат при використанні різних феросплавів, наприклад, феросіліцію, ферромарганцю, ферротитану, вуглецю, та їх кількості. Зокрема знаходження оптимальних з економічної точки зору рішень можна здійснювати вирішуючи задачу лінійного програмування, наприклад за процедурою, представленою в роботі [23], обираючи за критерій оптимізації мінімум витрат на шихту та феросплави:

$$J = \sum_{i=1}^n C_i U_i \rightarrow \min_{\{U_i\}}, i = \overrightarrow{1, n}, \quad (4.19)$$

де C_i – вартість i -го шихтового матеріалу,

U_i – кількість i -го шихтового матеріалу.

При цьому з кожним шихтовим матеріалом у готовий чавун вноситься $f_{ij}U_i$ кількість j -го елемента хімічного складу. Загальна ж кількість j -го елемента хімічного складу в готовому чавуні складає $\sum_{i=1}^n f_{ij}U_i$,

де f_j – задана загальна кількість j -го елемента хімічного складу у готовому чавуні.

Мінімізація функціоналу (4.19) здійснюється за обмежень виду:

$$\sum_{i=1}^n U_i = U^*, \quad (4.20)$$

$$\sum_{i=1}^n f_{ij}U_i = f_j. \quad (4.21)$$

Для оптимізації ударної в'язкості (a_n) обрано математичну модель (3.8), яка при фіксації на постійному нульовому рівні змінної x_2 , тобто при прийнятті умови $x_2=0$ (в нормованому вигляді), набуває вигляду

$$a_n = 0.863 - 1.15x_1 - 0.066x_3 + 2.946x_1^2 + 0.039x_3^2 + 0.137x_1x_3. \quad (4.22)$$

Реалізацією процедури (4.1)–(4.8) отримано такі результати:

$$\lambda_1 = 0.036932, \lambda_2 = 2.948053, a_n^* = 0.74 \text{ МДж/м}^2$$

Таке значення вихідної змінної у стаціонарній точці відповідає наступним нормованим та дійсним значенням вхідних змінних:

– нормовані значення $x_1=0.183015$, $x_3=0.524379$.

– натуральні значення: $C = 2.88 \%$, $Ti = 2.31 \%$.

Такі значення вхідних змінних, що забезпечують екстремум функції (4.17) знаходяться на радіусі $r = 0.555$.

Отже, рівняння, що описує поверхню відгуку в канонічній формі, має вигляд:

$$a_n - 0.74 = 0.183015\xi_1^2 + 2.948053\xi_2^2. \quad (4.23)$$

Оскільки співвідношення власних чисел за величиною та знаком визначають вид поверхні відгуку та $|\lambda_1| \neq |\lambda_2|, \lambda_1 > 0, \lambda_2 > 0$, поверхня відгуку є еліпсоїд. Виходячи з того, що обидві значення параметру λ є позитивними, екстремум функції є точка мінімуму. Фрагмент цього еліпсоїду показано на рис. 4.13.

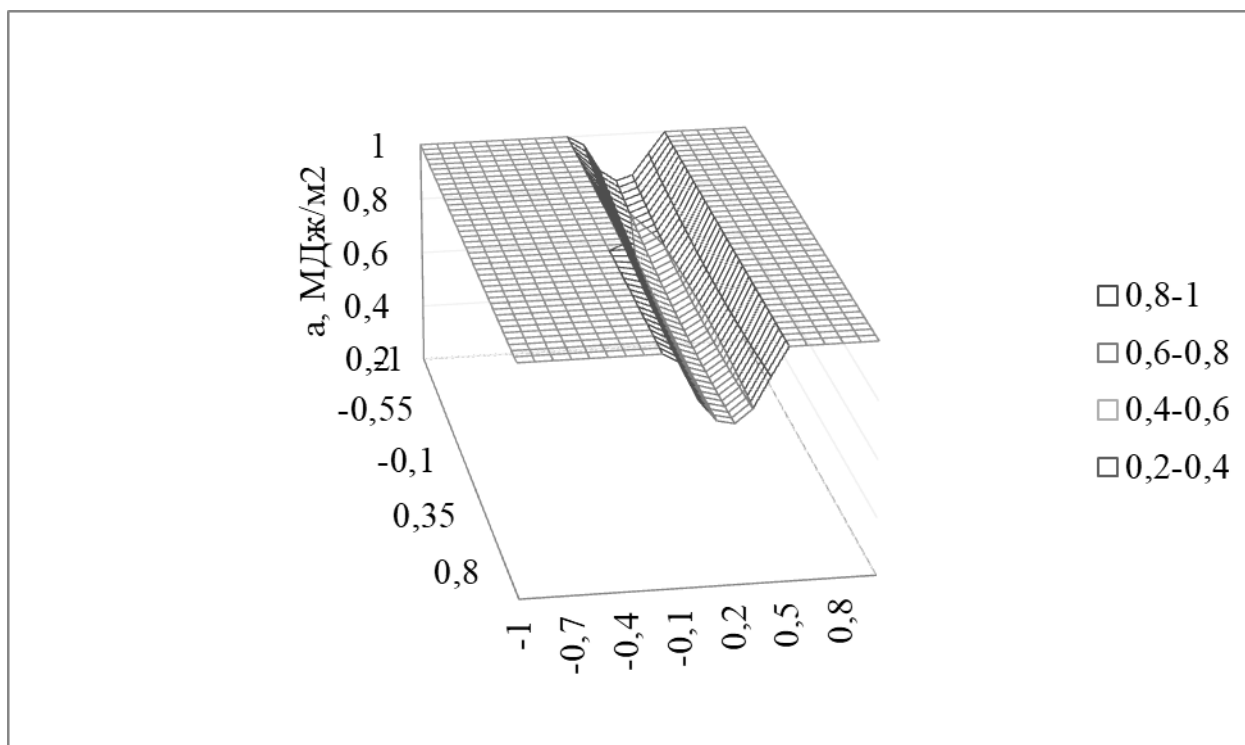


Рисунок 4.13 - Поверхня відгуку в нормованому вигляді $a_n = f(x_1; x_2=0; x_3)$, обмежена областю планування експерименту

На рис. 4.13 найближча вісь на площині вхідних змінних демонструє шкалу вхідної змінної x_1 , а ліва вісь – змінну x_3 .

З рис. 4.13 випливає чотири важливих висновку:

– найбільш суттєвим фактором впливу на ударну в'язкість чавуну є вміст вуглецю,

– вміст титану не впливає значною мірою на ударну в'язкість чавуну,

– вплив вмісту вуглецю на ударну в'язкість чавуну має яскраво виражений мінімум, що припадає на 2.88 % (в нормованому вигляді дорівнює значенню 0.183),

– висновок щодо адекватності моделі та впливу вмісту вуглецю на ударну в'язкість чавуну може бути зроблено лише за вузького діапазону варіювання вмісту вуглецю – близько $x_1 = (-0.1; 0.5)$.

На рис. 4.14, 4.15 представлено графічне рішення другого та третього рівнянь системи (4.9) в задачі гребеневого аналізу отриманої поверхні відгуку $a_n = f(x_1; x_2=0; x_3)$, аналітично описуваного рівнянням регресії виду (4.22).

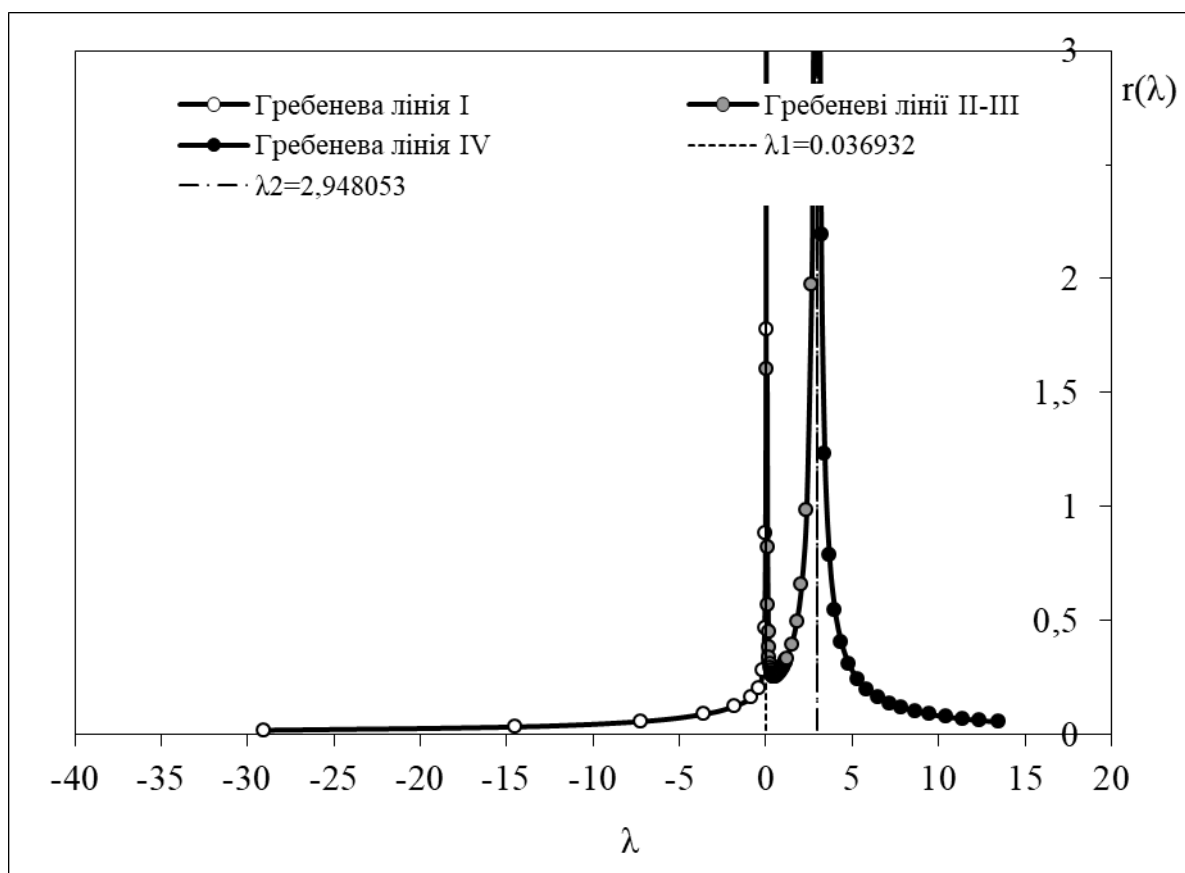


Рисунок 4.14 - $r=r(\lambda)$

Коефіцієнти математичної моделі $a_n=f(x_1; x_2=0; x_3)$ в матричному вигляді, що відповідає третьому рівнянню в системі (4.9), наведено в табл. 4.4.

Таблиця 4.4 - Коефіцієнти моделі $a_n=f(x_1; x_2=0; x_3)$

a_0	Розраховані значенні коефіцієнтів моделі		
	a	A	
0,863027	-0,57527	2,946431	0,0687
	-0,03279	0,0687	0,038554

Як видно з рис. 4.14, існує два полюси, відповідно до значень параметрів $\lambda_1=0.036932$, $\lambda_2=2.948053$, що розділяють уся область значень $r(\lambda)$ на 4 підобласті, що відповідають чотирьом гребневим лініям:

- гребенева лінія I: $\lambda=-\infty; 0.036932[$,
- гребеневі лінії II–III: $\lambda=]0.036932; 2.948053[$,
- гребенева лінія IV: $\lambda=]2.948053; +\infty[$.

Це дозволяє проаналізувати поведінку ударну в'язкість у всій області значень λ .

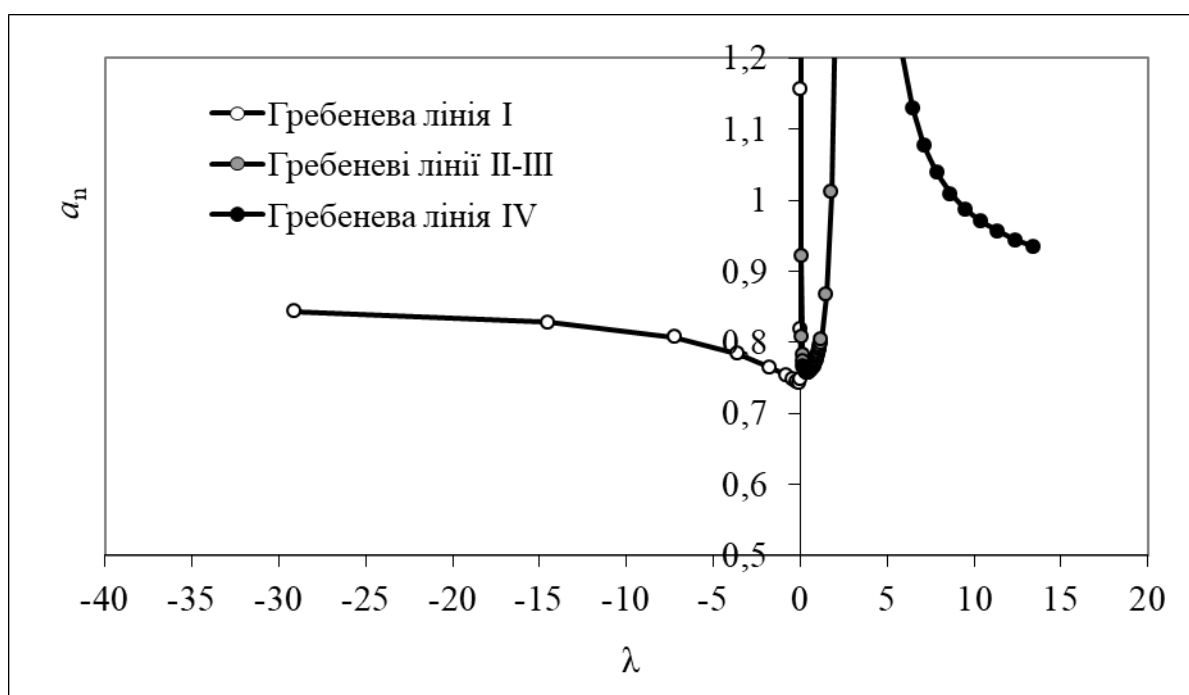


Рисунок 4.15 - $a_n = a_n(\lambda)$

Як впливає з рис. 4.15, в області значень від $\lambda=-30$ величина межі міцності на розтяг поступово зменшується, майже залишаючись сталою величиною, але при наближенні до полюсу $\lambda_1=0.036932$ стрімко збільшується. Така поведінка притаманна гребеневій лінії I.

Гребеневі лінії II–III мають типовий вигляд параболи з мінімумом, ліва гілка якої (гребенева лінія II) при наближенні до полюсу $\lambda_1=0.036932$ стрімко зростає. Аналогічну поведінку демонструє права гілка (гребенева лінія III). Зважаючи на фізичну сутність вихідної змінної, можна оперувати лише даними, що знаходяться в області мінімуму та забезпечує значення ударної в'язкості $a_n = 0.74$ МДж/м².

Гребенева лінія IV є інформативною лише в діапазоні від $\lambda \approx 7$.

Залежність a_n від радіуса $r(\lambda)$, описуючого обмеження, що накладаються на діапазон значень вхідних змінних областю планування, має вигляд, представлений на рис. 4.16. Ці обмеження задаються умовою $r=1.414$.

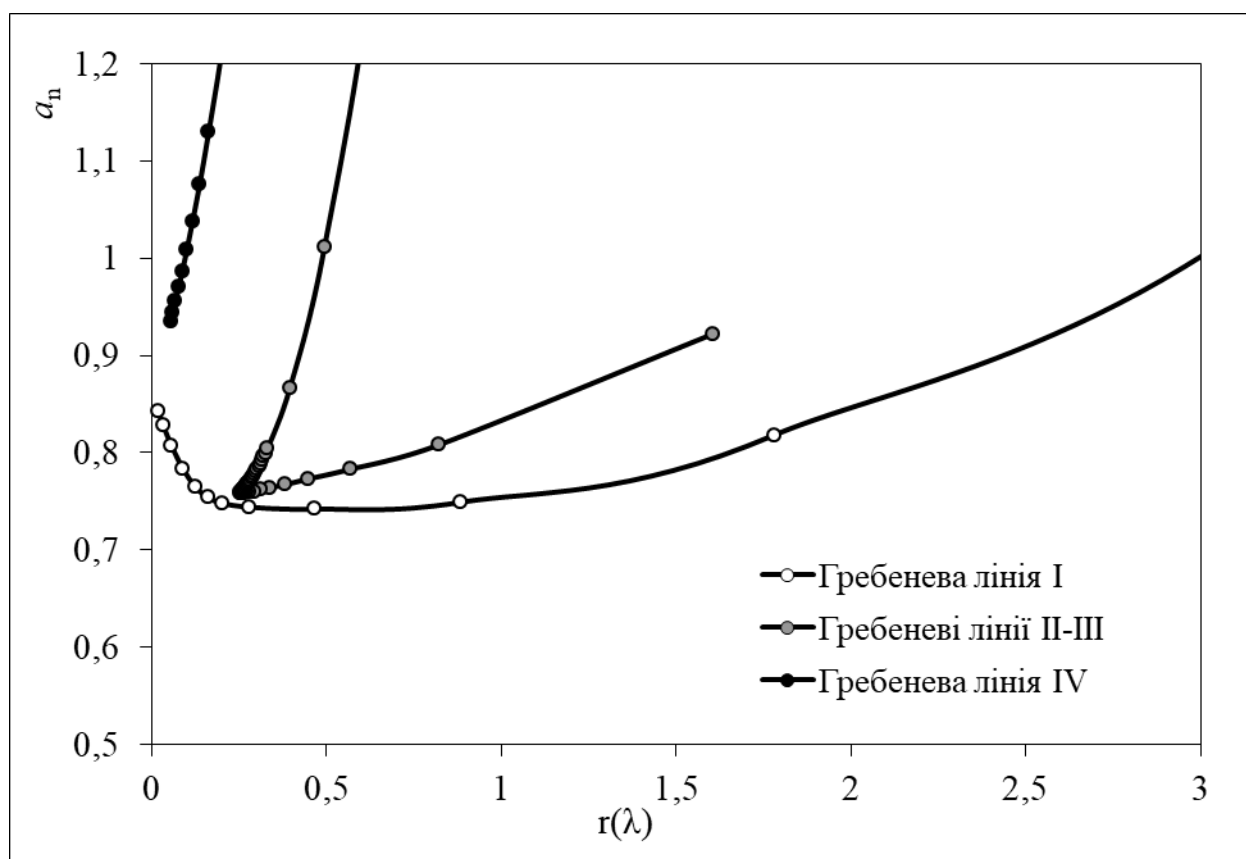


Рисунок 4.16 - $a_n = a_n(r)$

Як видно з рис. 4.16, мінімум ударної в'язкості досягається на гребеневій лінії I і він досягає 0.74 МДж/м^2 .

При цьому, як було визначено в результатах канонічного перетворення поверхні відгуку, екстремальні значення вмісту вуглецю та титану становлять 2.88 % та 2.31 %, відповідно. Зазначений мінімум знаходиться на радіусі $r = 0.555$, що видно безпосередньо з рис. 4.16. Однак зона мінімуму є надто розтягнутою, що дозволяє визначити цілу область значень радіусу та відповідні ним значення вхідних змінних. Це означає, що існує множина можливих значень вмісту вуглецю та титану, що забезпечують близькі до мінімуму значення ударної в'язкості.

Варто зазначити, що близькі до максимуму значення ударної в'язкості знаходяться на гребневих лініях II–III, але ближче до центру плану експерименту, що відповідає $r \approx 0.25$. Це дає можливість вибору інших комбінації значень вмісту вуглецю та титану, які забезпечують близькі до мінімуму значення ударної в'язкості.

Подальше наближення до центру плану приводить до підвищення ударної в'язкості, причому таке підвищення є більш стрімким на гребневих лініях III та IV.

Що стосується поведінки ударної в'язкості на гребеневій лінії I, то її величина стрімко зростає при віддаленні від центру плану експерименту.

Але задача полягає не в мінімізації ударної в'язкості, а в максимізації. Тому точка екстремуму, що визначена ($C=2.88\%$ та $Ti=2.31\%$), не представляє інтересу. Найбільший інтерес представляють області хімічних складів, що відповідають гребневим лініям III та IV в області обмежень до $r \approx 0.6$, або що відповідають гребневим лініям I та II на межі області обмежень $r=1.414$. Останні результати є гіршими, але важливо врахувати, що результати, отримані для гребневих ліній III та IV мають більше теоретичний вигляд і потребують практичного підтвердження, тобто до них варто ставитися обережно.

Висновки до розділу 4

1. Для оптимізації хімічного складу зносостійкого чавуну варто використовувати два методи: канонічне перетворення поверхні відгуку та гребеневий аналіз, тому що вони дозволяють аналізувати поверхню відгуку на предмет поведінки вихідних змінних при русі від центру плану експерименту. При цьому можуть бути визначені екстремуми функції, що описує вихідну змінну, а також локальні оптимуми з урахуванням обмежень, що накладаються на вхідні змінні. Такими обмеженнями можуть бути межі області варіювання вхідних змінних. В останньому випадку можуть бути знайдені саме оптимальні, тобто найкращі, значення вхідних змінних хімічного складу зносостійкого чавуну – навіть якщо вхідні змінні відповідають екстремумам, які не є найкращими рішеннями.

2. Аналізом поверхні відгуку $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ встановлено, що якщо за обмеження, що накладається, обрати діапазон області планування $C=(2.21-3.34)\%$ та $C_{eq}=3.183\%$, $Ti=(0.28-2.94)\%$, то можливе існування кількох субоптимальних рішень. Вони складають HRC47...HRC49. Значення твердості чавуну на обмеженні, що накладаються планом експерименту, точніше на межі цих обмежень, може бути таким самим, однак характер залежності $HRC=HRC(r)$ всередині цього діапазону інший і демонструє наявність точки мінімуму. Однак, зважаючи на не виражений явно мінімум, можна вважати значення твердості чавуну в цьому діапазоні за сталий.

3. Аналізом поверхні відгуку $K_{wr}=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ встановлено, що якщо за обмеження, що накладається, обрати діапазон області планування $C=(2.21-3.34)\%$ та $C_{eq}=3.183\%$, $Ti=(0.28-2.94)\%$ (в нормованому вигляді $[-1;1]$), що відповідає значенню $r=\sqrt{2}=1,414$, то можливе існування кількох субоптимальних рішень. Однак вони визначаються не як точки перетину гребневих ліній та обмеження $r=1,414$, а знаходяться всередині області $r=(0;1,414)$. При цьому максимум коефіцієнту зносостійкості не залежить від гребневої лінії та відповідає значенню r близькому до $r=0$.

4. З аналізу поверхні відгуку $\sigma_b = f(x_1; x_2=0; x_3)$ в нормованому вигляді впливає наступне:

- найбільш суттєвим фактором впливу на межу міцності на розтяг чавуну є вміст вуглецю,
- вміст титану не впливає значною мірою на межу міцності на розтяг чавуну,
- вплив вмісту вуглецю на межу міцності на розтяг чавуну має яскраво виражений максимум, що припадає на 2.82 % (в нормованому вигляді дорівнює значенню 0.083),
- висновок щодо адекватності моделі та впливу вмісту вуглецю на межу міцності на розтяг чавуну може бути зроблено лише за вузького діапазону варіювання вмісту вуглецю – близько $x_1 = (-0.3; 0.3)$.

5. З аналізу поверхні відгуку $\sigma_b = f(x_1; x_2=0; x_3)$ впливає, що максимум межі міцності на розтяг досягається досягає 390 МПа. При цьому, як було визначено в результатах канонічного перетворення поверхні відгуку, оптимальні значення вмісту вуглецю та титану становлять 2.82 % та 1.45 % відповідно. Зазначений максимум знаходиться на радіусі $r=0.148$. Але існують також близькі до максимуму значення межі міцності, однак на більшій віддаленості від центру плану експерименту – $r \approx 0.2$. Це дає можливість вибору інших комбінації значень вмісту вуглецю та титану, які забезпечують близькі до максимуму значення межі міцності на розтяг. Але найкращий хімічний склад при виборі за критерій оптимізації межі міцності на розтяг може бути обраний не лише з міркувань забезпечення максимуму цієї вихідної змінної, але й з економічних міркувань. Зокрема знаходження оптимальних з економічної точки зору рішень можна здійснювати вирішуючи задачу лінійного програмування, обираючи за критерій оптимізації мінімум витрат на шихту та феросплави.

6. З аналізу поверхні відгуку $a_n = f(x_1; x_2=0; x_3)$ впливає, що мінімум ударної в'язкості досягає 0.74 МДж/м². При цьому, як було визначено в результатах канонічного перетворення поверхні відгуку, екстремальні

значення вмісту вуглецю та титану становлять 2.88 % та 2.31 %. відповідно. Зазначений мінімум знаходиться на радіусі $r = 0.555$, однак зона мінімуму є надто розтягнутою, що дозволяє визначити цілу область значень радіусу та відповідні ним значення вхідних змінних. Це означає, що існує множина можливих значень вмісту вуглецю та титану, що забезпечують близькі до мінімуму значення ударної в'язкості.

7. З аналізу поверхні відгуку $a_n = f(x_1; x_2=0; x_3)$ випливає наступне:

- найбільш суттєвим фактором впливу на ударну в'язкість чавуну є вміст вуглецю,
- вміст титану не впливає значною мірою на ударну в'язкість чавуну,
- вплив вмісту вуглецю на ударну в'язкість чавуну має яскраво виражений мінімум, що припадає на 2.88 % (в нормованому вигляді дорівнює значенню 0.183),
- висновок щодо адекватності моделі та впливу вмісту вуглецю на ударну в'язкість чавуну може бути зроблено лише за вузького діапазону варіювання вмісту вуглецю – близько $x_1 = (-0.1; 0.5)$.

8. Близькі до максимуму значення ударної в'язкості знаходяться ближче до центру плану експерименту, що відповідає $r \approx 0.25$. Це дає можливість вибору інших комбінації значень вмісту вуглецю та титану, які забезпечують близькі до мінімуму значення ударної в'язкості. Подальше наближення до центру плану приводить до підвищення ударної в'язкості.

9. Зважаючи на те, що задача полягає не в мінімізації ударної в'язкості, а в максимізації, точка екстремуму, що визначена як $C=2.88$ % та $Ti=2.31$ %, не представляє інтересу. Найбільший інтерес представляють області хімічних складів, що відповідають обмеженням до $r \approx 0.6$, або що відповідають гребневим лініям I та II на межі області обмежень $r=1.414$. Однак ці рішення мають більше теоретичний вигляд і потребують практичного підтвердження.

Зміст розділу відображено у таких наукових публікаціях [114], [116], [117].

РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ
ЗНОСОСТІЙКОСТІ ЧАВУНУ ДЛЯ ВИЛИВКІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ В
УМОВАХ АБРАЗИВНОГО ТЕРТЯ

5.1 Визначення напрямків вибору раціональних легуючих комплексів

Вибір раціональних легуючих комплексів базується на визначенні якісного впливу кожного легуючого елементу на властивості чавуну, якими обрано твердість (HRC), коефіцієнт зносостійкості (K_{wr}), межа міцності на розтяг (σ_b), ударна в'язкість (a_n).

З аналізу рівнянь (4.13) та (4.14) випливає, що твердість має сідлову точку і шукати найкраще рішення стосовно того, як треба змінювати вміст вуглецю та титану, можна аналізуючи проєкцію поверхні відгуку $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, представлену на рис. 4.1, на площину «C – Ti» (рис. 5.1).

Тут мається на увазі наступне: сідлова точка забезпечую мінімум HRC , а треба отримати максимум, тобто зміщатися в просторі вхідних змінних «C – Ti» треба від сідлової точки. Причому, як видно з рис. 5.1, кращі значення твердості забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, але вміст титану в чавуні треба збільшувати.

Зважаючи на обмеженість області планування, слід враховувати, що абсолютний максимум при збільшенні кількості титану в чавуні визначити неможливо. Фактично можна зробити висновок щодо того, що максимум твердості чавуну, який може бути досягнутий, знаходиться на межі плану експерименту, що відповідає правому верхньому куту на проєкції поверхні відгуку $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti» (рис. 5.1).

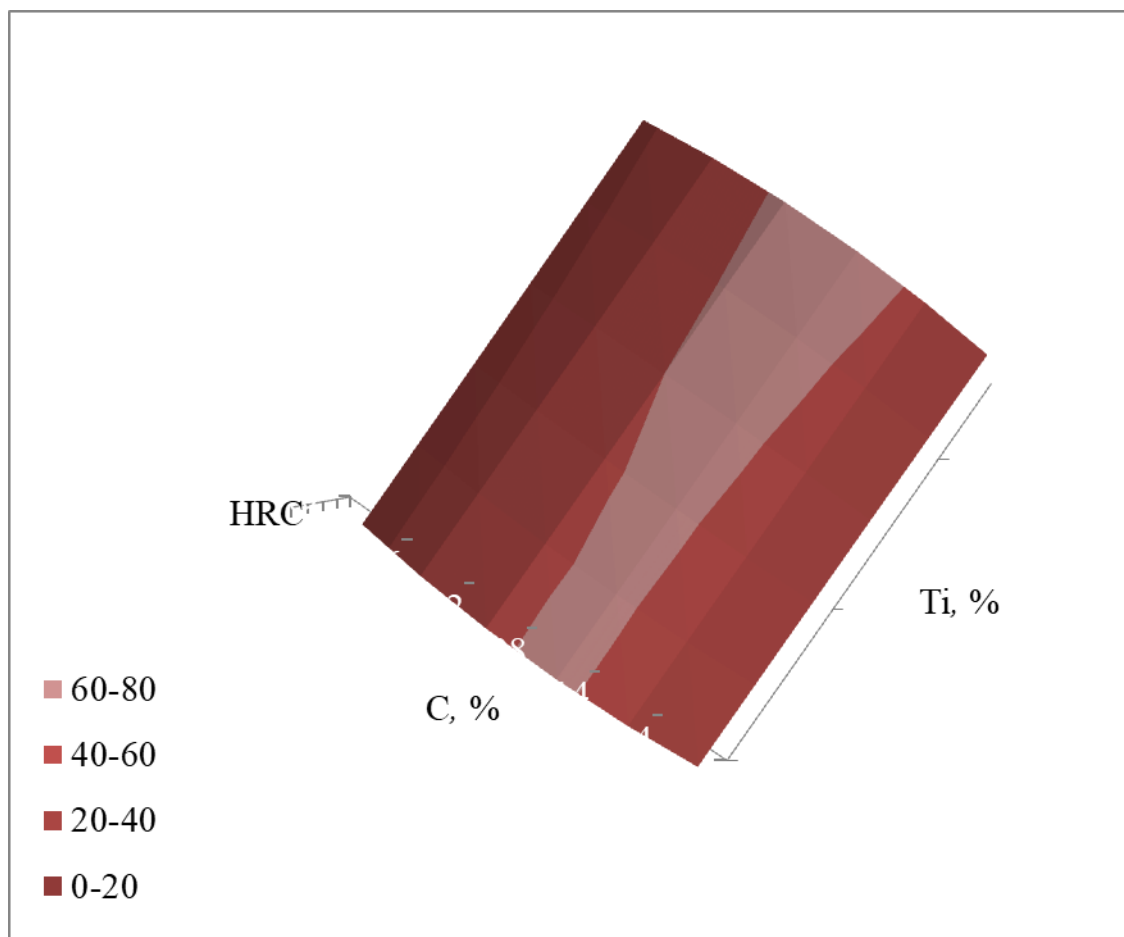


Рисунок 5.1 - Проекція поверхню відгуку $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti»

З аналізу рівнянь (4.15) та (4.16) випливає, що коефіцієнт зносостійкості не має сідлової точки, а має максимум. Шукати найкраще рішення стосовно того, як треба змінювати вміст вуглецю та титану, можна аналізуючи проекцію поверхні відгуку $K_{wr}=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, представлену на рис. 4.5, на площину «C – Ti» (рис. 5.2).

Як видно з рис. 5.2, кращі значення коефіцієнту зносостійкості забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, але вміст титану в чавуні теж має знаходитись в області середніх значень. Це означає, що абсолютний максимум знаходиться всередині області планування, тобто при збільшенні кількості титану в чавуні чи при його зменшенні, значення коефіцієнту зносостійкості буде зменшуватися. Тобто

рух по поверхні відгуку від центру плану, тобто від середнього вмісту вуглецю та титану, буде погіршувати значення коефіцієнту зносостійкості.

На рис. 5.2 ця область видима на найбільш світлому кольорі проєкції поверхні відгуку $K_{wr}=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti».

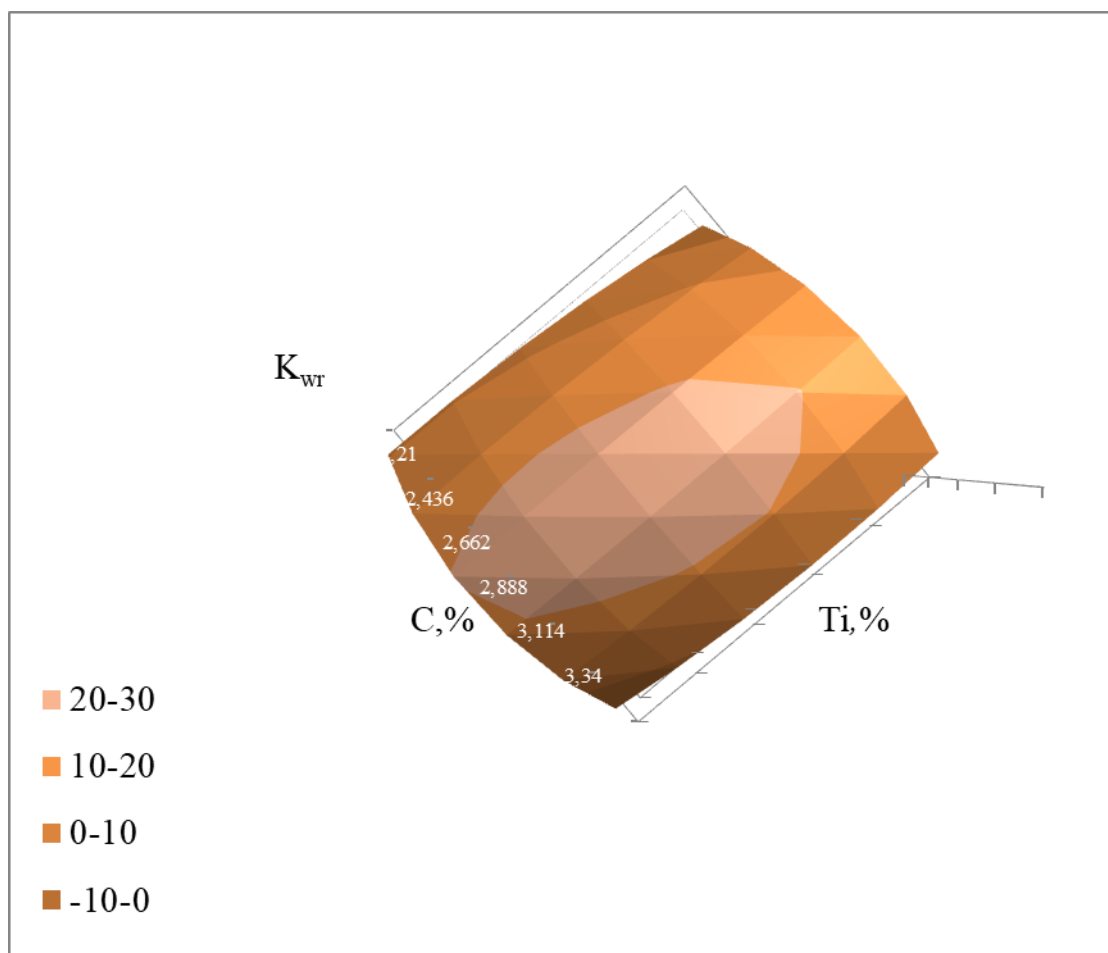


Рисунок 5.2 - Проєкція поверхню відгуку $K_{wr}=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti»

З аналізу проєкцій, наведених на рис. 5.1 та 5.2, можна зробити висновок про неоднозначний вплив твердості чавуну на коефіцієнт зносостійкості, бо щоб максимальне значення коефіцієнту зносостійкості припадає на сідлову точку поверхні відгуку $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$. Тобто максимум першого припадає на мінімум другого. Це свідчить не про пряму залежність коефіцієнту зносостійкості від твердості, а про складний характер такої залежності.

З аналізу рівнянь (4.17) та (4.18) випливає, що межа міцності на розтяг не має сідлової точки, а має максимум. Шукати найкраще рішення стосовно того, як треба змінювати вміст вуглецю та титану, можна аналізуючи проєкцію поверхні відгуку $\sigma_b = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, представлену на рис. 4.9, на площину «C – Ti» (рис. 5.3).

Як видно з рис. 5.3, кращі значення межі міцності на розтяг забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, а вміст титану в чавуні треба збільшувати. Зважаючи на обмеженість області планування, слід враховувати, що абсолютний максимум межі міцності на розтяг при збільшенні кількості титану в чавуні визначити неможливо. Фактично можна зробити висновок щодо того, що максимум межі міцності на розтяг чавуну, який може бути досягнутий, знаходиться на межі плану експерименту, що відповідає правому верхньому куту на проєкції поверхні відгуку $\sigma_b = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti» (рис. 5.3).

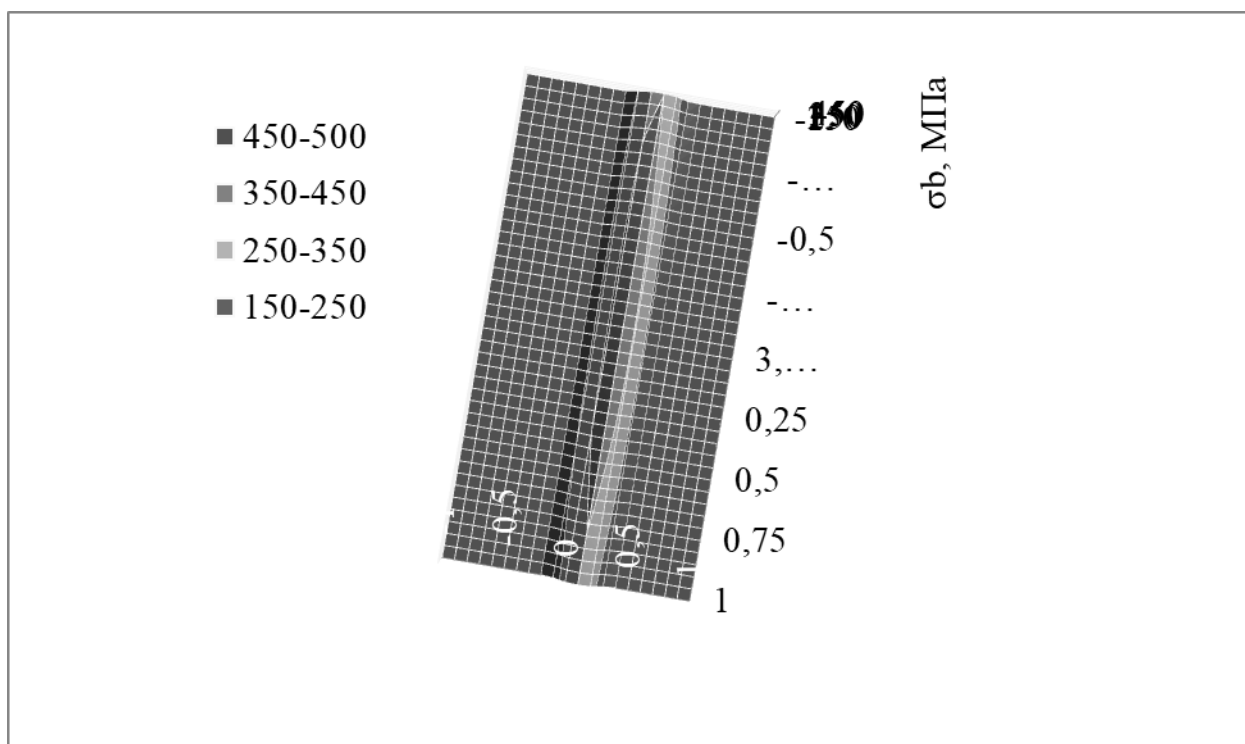


Рисунок 5.3 - Проєкція поверхню відгуку $\sigma_b = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti»

З аналізу рис. 5.3 можна зробити висновок, що межа міцності на розтяг має характер впливу на неї вуглецю та титану частково як твердість, а частково як коефіцієнт зносостійкості.

З аналізу рівнянь (4.22) та (4.23) випливає, що ударна в'язкість не має сідлової точки, а має мінімум. Шукати найкраще рішення стосовно того, як треба змінювати вміст вуглецю та титану, можна аналізуючи проєкцію поверхні відгуку $a_n = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, представлену на рис. 4.13, на площину «C – Ti» (рис. 5.4).

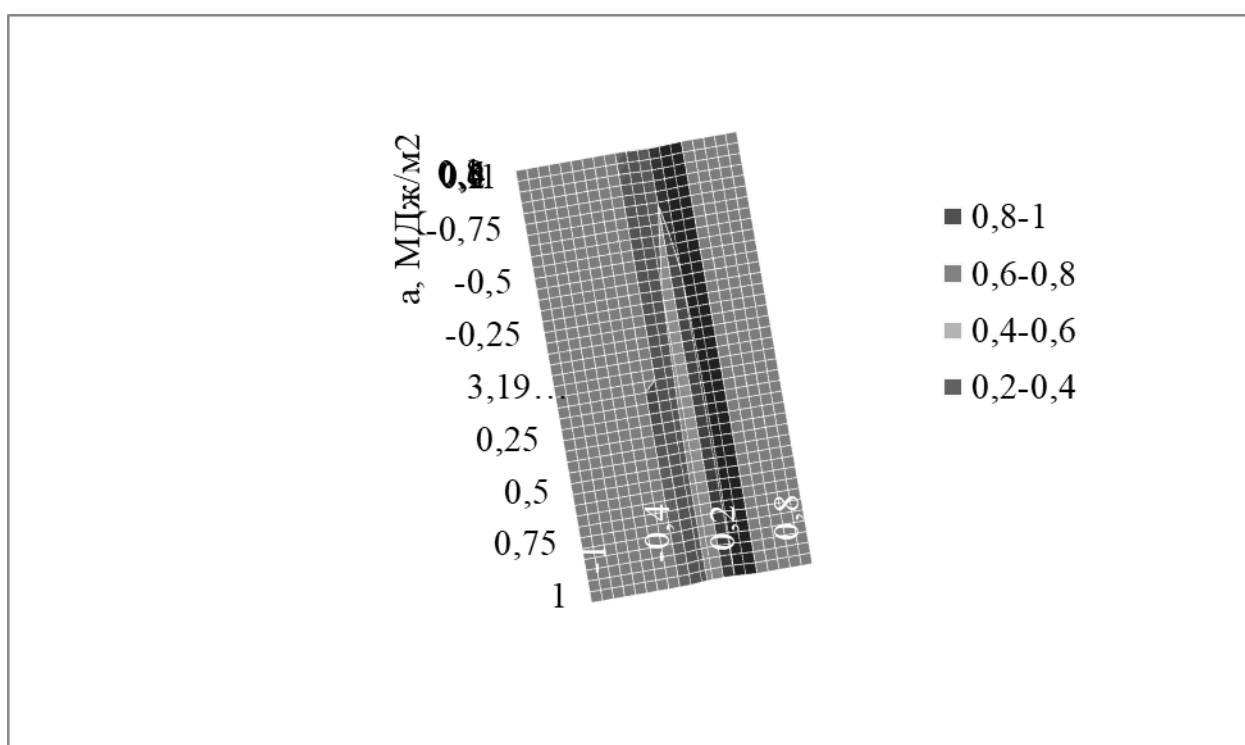


Рисунок 5.4 - Проекція поверхню відгуку $a_n = f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti»

Як видно з рис. 5.4, краща ударна в'язкість забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, а вміст титану в чавуні треба збільшувати. Зважаючи на обмеженість області планування, слід враховувати, що абсолютний максимум ударної в'язкості при збільшенні кількості титану в чавуні визначити неможливо. Фактично можна зробити висновок щодо того, що максимум ударної в'язкості чавуну, який може бути досягнутий, знаходиться на межі плану експерименту, що відповідає верхній

частині проєкції поверхні відгуку $a_n=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti» – найбільш темний колір на рис. 5.4.

З аналізу рис. 5.4 можна зробити висновок, що ударна в'язкість чавуну поводить себе не так, як інші вихідні змінні. Зокрема це проявляється в тому, що поверхня відгуку має мінімум, в той час як потрібно мати максимум.

Сумісний аналіз проєкцій поверхонь відгуку $HRC=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, $K_{wr}=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, $\sigma_b=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$, $a_n=f(C; C_{eq}=3.183; Ti)$ на площину «C – Ti» свідчить про те, що усі вихідні змінні, які розглядаються, мають конкуренції – зміна вмісту вуглецю та титану в чавуні приводить до різного характеру поведінки вихідних змінних. Тому було проведено сумісний аналіз, яких базується на аналітичному визначенні допустимих меж вмісту вуглецю та титану, що забезпечують компромісні рішення.

Для того щоб обрати раціональний за компромісними критеріями C-Ti комплекс, необхідно вирішити наступні задачі:

- сформуванню загальну систему рівнянь, що описують вплив вуглецю та титану на вихідні змінні,
- обрати допустимі межі значень по кожній вихідній змінній,
- побудувати графічно допустимі області значень вуглецю та титану, що забезпечують компромісні рішення по усіх вихідних змінних.

Загальну система рівнянь, що описують вплив вуглецю та титану на вихідні змінні, формується з канонічних рівнянь (4.14), (4.16), (4.18), (4.23):

$$\begin{cases} HRC - 46.7 = -22.7671\xi_1^2 + 0.522177\xi_2^2, \\ K_{wr} - 12.5 = -13.758\xi_1^2 - 2.7224\xi_2^2, \\ \sigma_b - 390 = -3318.98\xi_1^2 - 49.2889\xi_2^2, \\ a_n - 0.74 = 0.183015\xi_1^2 + 2.948053\xi_2^2. \end{cases} \quad (5.1)$$

Допустимі межі значень по кожній вихідній змінній задаються або з умов відповідності стандартам, або з умов відповідності технічним умовам (ТУ).

Прийняті наступні допустимі межі значень:

$$HRC=45-48,$$

$$K_{wr}, \text{ \%}=11-12,$$

$$\sigma_b, \text{ МПа}=350-380,$$

$$a_n, \text{ МДж/м}^2= 0.8-1.0.$$

Графічно допустимі області значень вуглецю та титану, що забезпечують компромісні рішення по усіх вихідних змінних, будуються перетворенням кожного рівняння відносно ξ_2 , приведенням його до вигляду $\xi_2=\varphi(\xi_1)$:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_2 = \sqrt{\frac{(HRC - 46.7) + 22.7671\xi_1^2}{0.522177}} = \sqrt{\frac{(HRC - 46.7)}{0.522177} + \frac{22.7671}{0.522177}\xi_1^2}, \\ \xi_2 = \sqrt{\frac{(K_{wr} - 12.5) + 13.758\xi_1^2}{-2.7224}} = \sqrt{\frac{(K_{wr} - 12.5)}{-2.7224} - \frac{13.758}{2.7224}\xi_1^2}, \\ \xi_2 = \sqrt{\frac{(\sigma_b - 390) + 3318.98\xi_1^2}{-49.2889}} = \sqrt{\frac{(\sigma_b - 390)}{-49.2889} - \frac{3318.98}{49.2889}\xi_1^2}, \\ \xi_2 = \sqrt{\frac{(a_n - 0.74) - 0.183015\xi_1^2}{2.948053}} = \sqrt{\frac{(a_n - 0.74)}{2.948053} - \frac{0.183015}{2.948053}\xi_1^2}. \end{array} \right. \quad (5.2)$$

Підстановка заданих меж значень вихідних змінних в (5.2) приводить до системи з 8 рівнянь:

- перші два рівняння відносяться до двох рівнів (max та min) HRC ,
- третє та четверте рівняння відносяться до двох рівнів (max та min) K_{wr} ,
- п'яте та шосте рівняння відносяться до двох рівнів (max та min) σ_b ,
- сьоме та восьме рівняння відносяться до двох рівнів (max та min) a_n .

$$\left\{ \begin{aligned}
 \xi_2 &= \sqrt{\frac{(HRC_{\max} - 46.7) + 22.7671\xi_1^2}{0.522177}} = \sqrt{2.49 + 43.6\xi_1^2}, \\
 \xi_2 &= \sqrt{\frac{(HRC_{\min} - 46.7) + 22.7671\xi_1^2}{0.522177}} = \sqrt{-3.256 + 43.6\xi_1^2}, \\
 \xi_2 &= \sqrt{\frac{(K_{wr\max} - 12.5) + 13.758\xi_1^2}{-2.7224}} = \sqrt{0.184 - 5.054\xi_1^2}, \\
 \xi_2 &= \sqrt{\frac{(K_{wr\min} - 12.5) + 13.758\xi_1^2}{-2.7224}} = \sqrt{0.55 - 5.054\xi_1^2}, \\
 \xi_2 &= \sqrt{\frac{(\sigma_{b\max} - 390) + 3318.98\xi_1^2}{-49.2889}} = \sqrt{0.203 - 67.337\xi_1^2}, \\
 \xi_2 &= \sqrt{\frac{(\sigma_{b\min} - 390) + 3318.98\xi_1^2}{-49.2889}} = \sqrt{0.812 - 67.337\xi_1^2}, \\
 \xi_2 &= \sqrt{\frac{(a_{n\max} - 0.74) - 0.183015\xi_1^2}{2.948053}} = \sqrt{0.088 - 0.062\xi_1^2}, \\
 \xi_2 &= \sqrt{\frac{(a_{n\min} - 0.74) - 0.183015\xi_1^2}{2.948053}} = \sqrt{0.02 - 0.062\xi_1^2}.
 \end{aligned} \right. \quad (5.3)$$

Припустимі області вмісту вуглецю та титану знаходяться всередині меж:

- для твердості чавуну: $(HRC_{\min} - HRC_{\max})$,
- для коефіцієнту зносостійкості $(K_{wr\min} - K_{wr\max})$,
- для межі міцності на розтяг $(\sigma_{b\min} - \sigma_{b\max})$,
- для уданої в'язкості $(a_{n\min} - a_{n\max})$.

Перетин цих меж визначає такі області вмісту вуглецю та титану, які задовольняють кожній з умов щодо відповідної властивості чавуну. Однак важливо враховувати, що можливі ситуації, коли такі області не перетинаються. Це означає, що відповідні умови, тобто вихідні змінні, що описують властивості чавуну, не можуть бути забезпечені одночасно, тобто такі вихідні змінні є конфліктними. В такому разі треба обирати найбільш важливу змінну і при виборі хімічного складу та операцій легування орієнтуватися саме на цю властивість.

На рис. 5.5 представлені рішення системи рівнянь (5.3), де різними кольорами позначені рішення, що відповідають дослідженим вихідним змінним, кожна з яких задана на двох рівнях (min – max). Зважаючи на характер поверхонь відгуку, рішення є симетричними відносно осі ξ_1 .

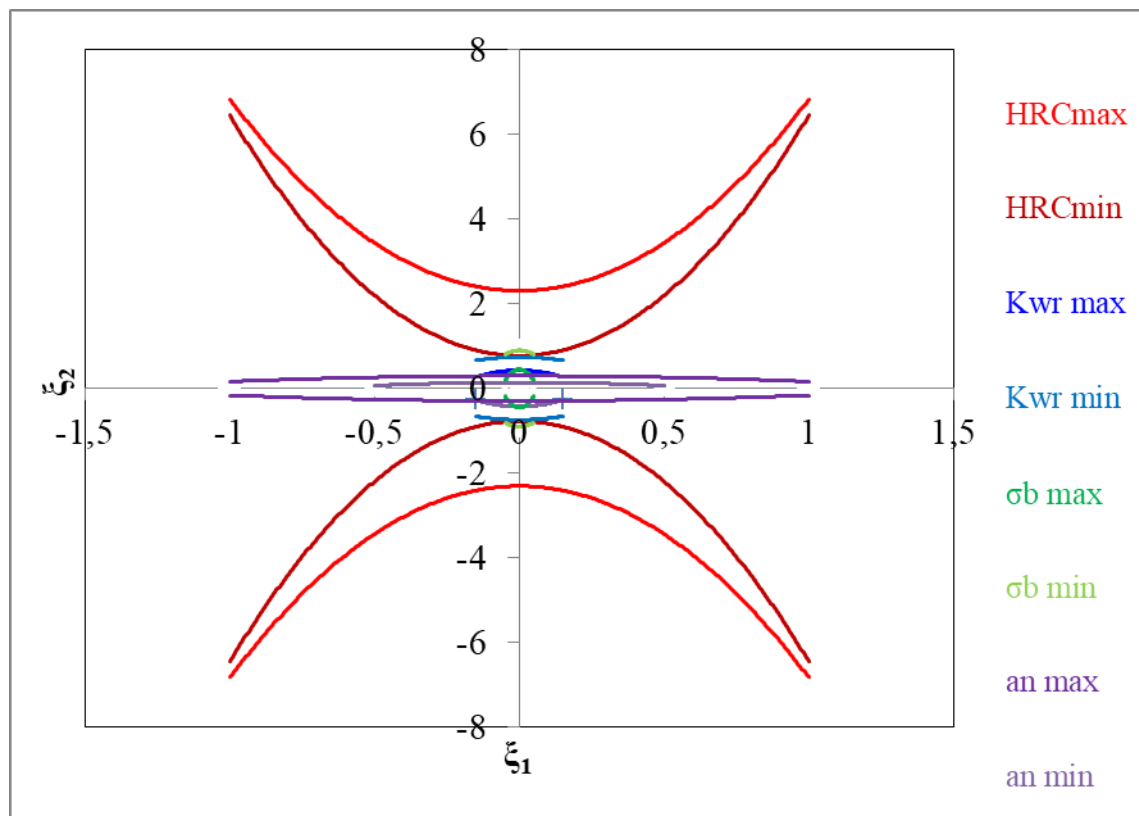


Рисунок 5.5 - Визначення допустимих меж вмісту вуглецю та титану на основі рішення системи (5.3).

Як видно з рис. 5.5, за обраної області вхідних змінних неможливо забезпечити одночасно задані вище умови по твердості та по усіх інших властивостях чавуну, бо відповідні області всередині не перетинаються. Тому треба або зробити пріоритетною вимогою *HRC*, або вимоги по інших трьох вихідних змінних. Іншим рішенням може бути розширення припустимої межі по твердості в бік менших значень, тобто $HRC < 45$. Це пересуне нижню криву у верхній півплощини нижче та верхню криву у нижній півплощини графіку.

На рис. 5.6 представлене рішення для першого з варіантів, тобто коли вимога по твердості не робиться пріоритетною, а пріоритет віддається комплексу інших властивостей.

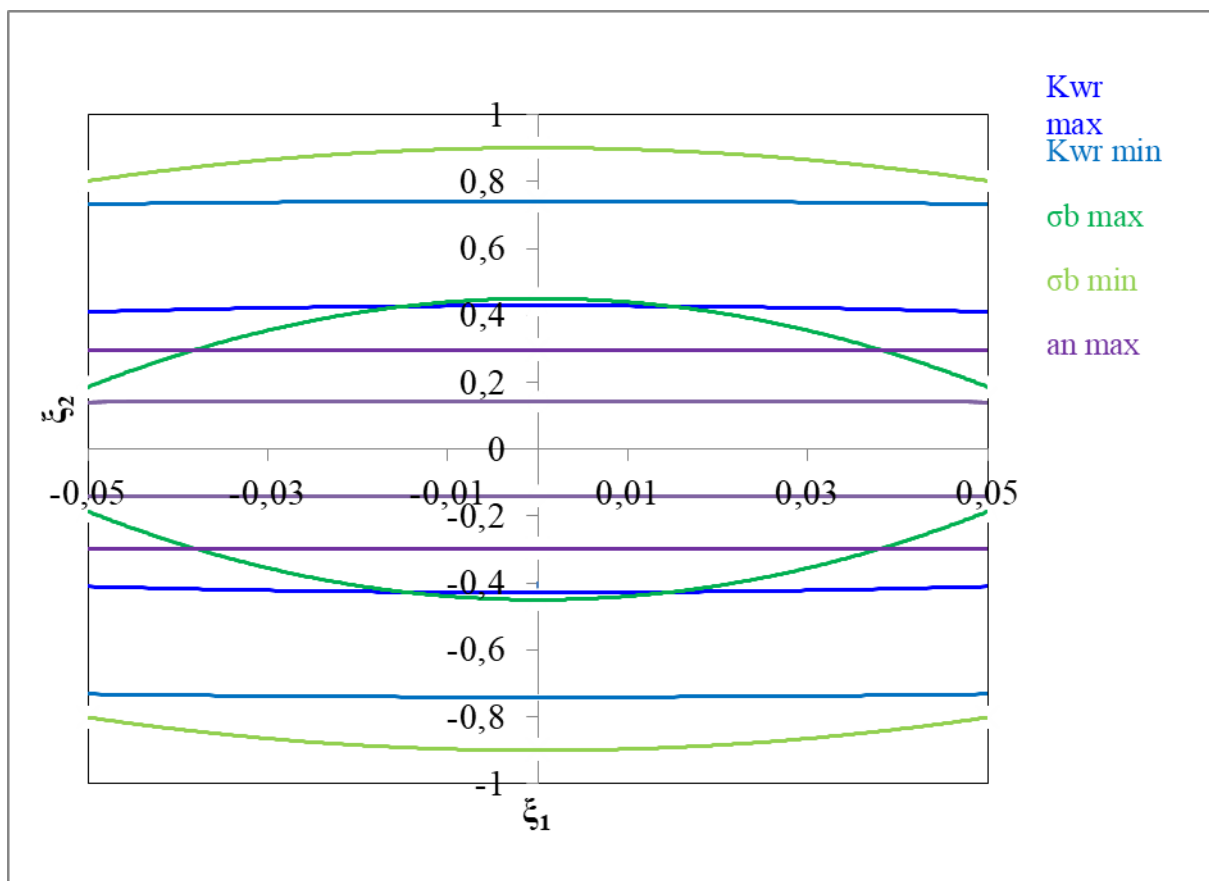


Рисунок 5.6 - Визначення допустимих меж вмісту вуглецю та титану на основі рішення системи (5.3) без урахування вимог по твердості.

З рис. 5.6 видно, що можна забезпечити одночасно вимоги по σ_b та K_{wr} в доволі широкому діапазоні, або в надто меншому діапазоні одночасне забезпечення вимог по σ_b та a_n . Однак одночасне забезпечення вимог по K_{wr} та a_n не можливе.

З зазначеного можна зробити висновок, що коефіцієнт зносостійкості та ударна в'язкість є конфліктними вихідними змінними. Конфліктність властивостей HRC та σ_b може бути усунена зменшенням вимоги по величині HRC , при цьому буде також усунена конфліктність між HRC та K_{wr} , а, ймовірно, й між HRC та a_n .

Такі висновки дозволяють обрати напрямок вибору легуючих комплексів, їх кількості та технології виплавки чавуну. При цьому можна орієнтуватись на індукційну плавку синтетичного чавуну, легованого додатково хромом, нікелем, міддю, ванадієм та бором.

5.2 Технологія виплавки комплексно легованого зносостійкого чавуну для лопаток асфальтозмішувачів

Для відпрацювання технологічних рішень, спрямованих на отримання зносостійкого чавуну для представника деталей, що працюють в умовах інтенсивного абразивного тертя, – лопаток асфальтозмішувачів, було реалізовано серійні плавки в умовах чавуноливарного цеху заводу дорожніх машин.

Для виплавки чавуну та розливання його в ливарні форми використовувалось наступне обладнання та інструменти:

- піч високочастотна індукційна ІСТ0,4/0.5-ІЗ,
- скребок для знаття шлаку довжиною не меншою за 1 м,
- кокіль для заливки проб,
- механізований підйомник з чайниковим ковшом вантажопідйомністю $Q=70$ кг,
- кран вантажопідйомністю $Q=5$ т,
- короб для повернення виливків,
- ложка для відбору проб.

Основні технічні характеристики печі ІСТ0,4/0.5-ІЗ наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1 - Основні технічні характеристики печі ІСТ0,4/0.5-ІЗ

№з/п	Найменування параметрів	Норма
1	2	3
1	Ємність електропечі, т.	0.4
2	Потужність середньої частоти, кВт	458
3	Потужність живлячого перетворювача частоти, кВт	500
4	Потужність, що споживається (від мережі), кВт	505

1	2	3
5	Число фаз живлячої мережі контурного ланцюга	3 1
6	Номінальна частота електричного струму, Гц	1090
7	Номінальна напруга, В живлячої мережі контурного ланцюга (на індукторі) ланцюгів керування приводу установки насосної	6000 800–1000 220 380
8	Коефіцієнт потужності після компенсації ($\cos\varphi$), не менше	0.95
9	Температура перегріву металу, °С	1600
10	Витрата охолоджуючої води при перепаді температури води 25 °С, м³/год, в тому числі: індуктора, перетворювача частоти, батареї конденсаторів	10.95 ^{+0.45} 4.75 ^{+0.45} 5.4 0.8
11	Необхідний тиск води, МПа	0.4–0.6
12	Необхідний тиск води для охолодження перетворювача, не більш ніж, МПа	0.35
13	Швидкість розплавлення та перегріву, т/год	0.78 _{-0.05}
14	Питома витрата електроенергії (по мережі), кВт·год/т	648 ⁺⁴⁰
15	Маса електропечі (комплекту), т	7.7
16	Маса електропечі, т	0.94
17	Маса футеровки, т	0.159
18	Тепловиділення від печі, ккал/год	6616
19	Встановлений ресурс індуктора до капітального ремонту, год	5500

Технологічний процес включав наступні технологічні операції:

1. Підготовка печі до плавки.
2. Завантаження шихти та плавлення.
3. Випуск металу та розливка.
4. Контроль якості.

Підготовка печі до плавки полягла в наступному.

Після перевірки справності механізмів печі відбувався огляд стану футеровки. Тигель не мав містити тріщин, опуклостей, провалів. Якщо на внутрішній поверхні тигля виявлялися місцеві поглиблення чи тріщини, вона закривалася масою, що використовується для футерування печі.

Завантаження печі відбувалося відповідно до обраних норм витрати шихтових матеріалів, якими були:

- рідкий чавун марки СЧ200,
- лом сталевий 1А,
- повернення власного виробництва,
- феромарганець ФМн-75,
- ферохром ФХ100, ФХ200,
- нікель металевий Н1,
- феробор ФБ-20,
- сілікованадій ФС40Вд7.

Лом сталевий, повернення власного виробництва, феросплави завантажувались у відповідності з нормативною шихтою. Дані завантаження заносилися в плавильний журнал.

Порядок завантаження був таким: на дно тигля засипалися шлакоутворюючі: сухий пісок в кількості 5 кг, вапняк в кількості 1 кг фракцією до 30 мм. Потім завантажувався лом сталевий, повернення власного виробництва, нікель металевий, феромарганець, ферохром, сілікованадій.

Шихта укладалась щільно, за можливостями концентричними кільцями паралельно виткам котушки індуктора. Механічні удари по футеровці при завантаженні не допускалися.

На подину тигля укладалась дрібна шихта. Плaskі куски укладались плазом з мінімальними зазорами для кращого прогріву. На завантажену дрібну шихту укладались крупні шматки, зберігаючи обережність та не допускаючи ушкодження футеровки печі.

Куски шихти не мали виступати за межі габаритів печі.

Завантажуючи шихту вона осаджувалась ломом діаметром 18-22 мм, довжиною 1 м.

Після завантаження печі починалася плавка. Технологічні операції плавки полягали в наступному.

1. На індуктор, батарею конденсаторів та перетворювач частоти подавалась вода.

2. На індуктор та батарею конденсаторів подавалась напруга від перетворювача підвищеної частоти.

Керування режимом плавки здійснюється як вручну, так і автоматично зі шафи керування. В процесі плавки по показникам приладів, встановлених на щиті керування, здійснюється спостереження за станом тигля.

Далі процес відбуваються в такій послідовності:

1. Шихта прогривається протягом 5 хвилин.
2. Піч вимикається.
3. Заливається рідкий чавун в кількості, визначеній норма на шихту, рідкий чавун відбирається з роздавального ківша.
4. Піч вмикається.
5. Шихта розплавляється.
6. Заливається кокіль для проб на хімічний аналіз, або стрижньова форма.

7. За результатами хімічного аналізу чавуну він доводиться до заданого шляхом введення феросплавів: феромарганця, ферохрома, феробора, сілікованадія.

8. Після повного розплавлення феросплавів протягом 3-5 хвилин метал підігрівається.

9. З поверхні дзеркала металу знімається шлак.

10. Готується ложка для відбору проб, кокіль для проб та бирка з номером плавки.

11. Кокіль для проб заливається металом, а в рідкий метал встановлюється бирка з номером плавки.

12. Охолоджена проба вибивається з кокіля, охолоджується на повітрі та передається у відділ Метролога для визначення хімічного складу та твердості.

Випуск металу та розливка відбуваються в наступній послідовності.

1. Перед випуском металу піч вимикається.
2. Шляхом повороту печі ківш ємністю 70 кг наповнюється металом.
3. Піч повертається в горизонтальне положення і вмикається.
4. Ківш з металом по бірельсу переміщується до кокільних машин та метал розливається протягом 3–5 хвилин.
5. Ківш переміщається до печі після розливки.
6. Операції 1–5 повторюються до повного випуску металу з печі.
7. Після закінчення розливки металу піч оглядається. За необхідності виконується ремонт футеровки тигля та жолоба.

В разі відсутності рідкого чавуну дозволяється працювати на твердій шихті .

Контроль якості здійснюється таким чином.

Результати хімічного аналізу та твердості розповсюджуються на виливки, що залиті з однією плавки незалежно від часу розливки металу.

В технологічному процесі виплавки чавуну враховується наступне. Кожен з елементів з хімічного складу, що виконує функцію легування, має

впливати на твердість чавуну, яка за промислових умов вважається за головну, тому що саме твердість визначає експлуатаційні властивості деталей, що працюють за умов інтенсивного абразивного тертя.

Таким чином розглядається комплексно легований чавун – борохромонікелеванадієвий чавун, який є залізо-вуглецевим сплавом, легованим титаном, міддю, хромом, нікелем, бором, ванадієм, що відповідає хімічному складу, наведеному в табл. 5.2.

Таблиця 5.2 - Хімічний склад борохромонікелеванадієвого чавуну

Склад компонентів, %									
Si	Cr	Mn	Ti	Ni	Cu	B	V	P	S
1.3–2.0	1.2–2.0	2.5–3.5	0.08– 0.15	0.5– 1.0	0.2– 0.3	0.02– 0.03	0.2– 0.3	до 0.5	до 0.15

Вибір такого складу обумовлений, зокрема тим, що підвищення вмісту марганця, як карбідоутворюючого елементу, призводить до зменшення величини вуглецевого еквіваленту, що зміщує положення оптимальних точок в моделях впливу титану та вуглецю на досліджувані властивості чавуну. Зменшення вмісту вуглецю забезпечує можливість зменшення кількості титану без погіршення твердості, але з забезпеченням ефекту економії титану як кошторисного металу.

Вміст міді забезпечується наявністю його в шихті в складі повернення власного виробництва, а введення хрому традиційно здійснюється в комбінації з нікелем задля забезпечення необхідних значень межі міцності на розтягування.

Ванадій та бор мають забезпечувати позитивний вплив на твердість як сильні карбідоутворюючі елементи.

Механічні властивості, що є пріоритетними в даному випадку, – це твердість, яка має бути забезпечення на рівні не менш ніж HRC48.

Такий рівень твердості може бути прогнозований з урахуванням обраних напрямків комплексного легування.

Шихтові матеріали, які використовуються для отримання чавуну, наведені в табл. 5.3.

Таблиця 5.3 - Шихтові матеріали для виплавки борохромонікелеванадієвого чавуну

№з/п	Найменування матеріалу	Марка
1	Чавун рідкий	СЧ200 легований
2	Повернення борохромонікелеванадієвого чавуну	
3	Феромарганець	ФМн-75
4	Ферохром	ФХ-100 ФХ-200
5	Нікель металевий	Н1
6	Феробор	ФБ-20
7	Сілікованадій	ФС-40ВД
8	Лом сталевий та відходи	1А

Враховані наступні важливі технологічні складові:

– хімічний склад шихтових матеріалів має бути перевірений відділом Головного метролога у відповідності до карти вхідного контролю та відповідати маркам, наведеним в табл. 5.3,

– усі шихтові матеріали мають бути розсортовані по марках та на кожну марку має бути сертифікат хімічного складу відповідного шихтового матеріалу,

– шихтові матеріали повинні мати габарити не більш ніж 150 мм, масою не більш ніж 15 кг,

- шихта має бути сухою, очищеною від бруду, іржі, забруднення маслом,
- використання в шихті кольорових матеріалів (алюміній, цинк, мідь) заборонено,
- феросплави, що вводяться в піч під час плавки, мають бути подрібнені до розмірів шматка 30х30 мм, сухими, підігрітими на печі у дзеркала металу,
- у випадку подачі шихти на ділянку в дощову чи сніжну погоду шихта має вистоятися на ділянці не менш ніж одну зміну.

Технологічний процес регламентований наступними мірами безпеки.

1. Перед роботою перевіряється справність заземлення індукційної печі.
2. Усі роботи по ремонту електропечі та її обладнання мають проводитись при знятій напрузі.
3. При проведенні робіт по обслуговуванню конденсаторів необхідно переконавшись у відсутності остаточного заряду на конденсаторах.
4. Заборонено працювати на незаземленій печі.
5. Заборонено проводити огляди та ремонтні роботи в нахиленому та незафіксованому від зворотного ходу положенні печі.
6. При попаданні води в тигель з розплавленим металом відбувається викид розплавленого металу. Для попередження цього необхідно дотримуватись наступного:
 - не допускати зниження температури води на вході в індуктор нижче 15 °С, так як це призводить до відпотівання трубки індуктора та, як наслідок, до пробоя міжвіткової ізоляції та короткому замиканню (рис. 5.8),



Рисунок 5.8 - Операції з обслуговування системи охолодження

– перед кожною плавкою треба слідкувати за геометричними розмірами тигля, не допускаючи зносу стінок тигля більш ніж 20–25% їх початкової товщини,

– сигналізатор стану футеровки забезпечує контроль за станом тигля , однак не позбавляє від необхідності візуального контролю,

– не допускається випадкове попадання води на тигель до завантаження, під час підвантаження шихти та присадкових матеріалів.

7. Усі шихтові матеріали, що завантажуються в піч, а також робочий інструмент мають бути сухими.

8. Завантаження феросплавів в піч проводиться з попереднім підігрівом їх біля дзеркала металу на печі.

9. Зон витяжної вентиляції має знаходитись над працюючою піччю до розливки металу в ківш.

10. Заборонено випускати метал в сирий ківш.

11. Злив металу з печі в ківш проводити при відключеній напрузі печі.

12. Заборонено заповнювати ківш з сирою футеровкою розплавленим металом.

13. Ретельно перевіряється справність, міцність та безвідмовне керування розливальних ковшів.

14. Не заповнювати ківш металом до верху при його транспортуванні задля недопущення розплескування металу, рівень металу не має доходити до бортів ковша на 40-50 мм.

15. При заливці металу в кокіл необхідно:

- тримати ківш якнайближче до чаші,
- не переливати метал через край чаші,
- не допускати розливу металу біля кокілю та в проходах.

5.3 Результати визначення хімічного складу, мікроструктури та твердості борохромонікелеванадієвого чавуну

Для контролю показників виплавленого борохромонікелеванадієвого чавуну здійснювався відбір проб на хімічний аналіз та твердість, заливалися клинові проби для визначення мікроструктури. Це здійснювалось з результатів серійних плавок.

На рис. 5.9 показано вміст вуглецю та кремнію в чавуні, а на рис. 5.10 вміст марганцю та вуглецевий еквівалент.

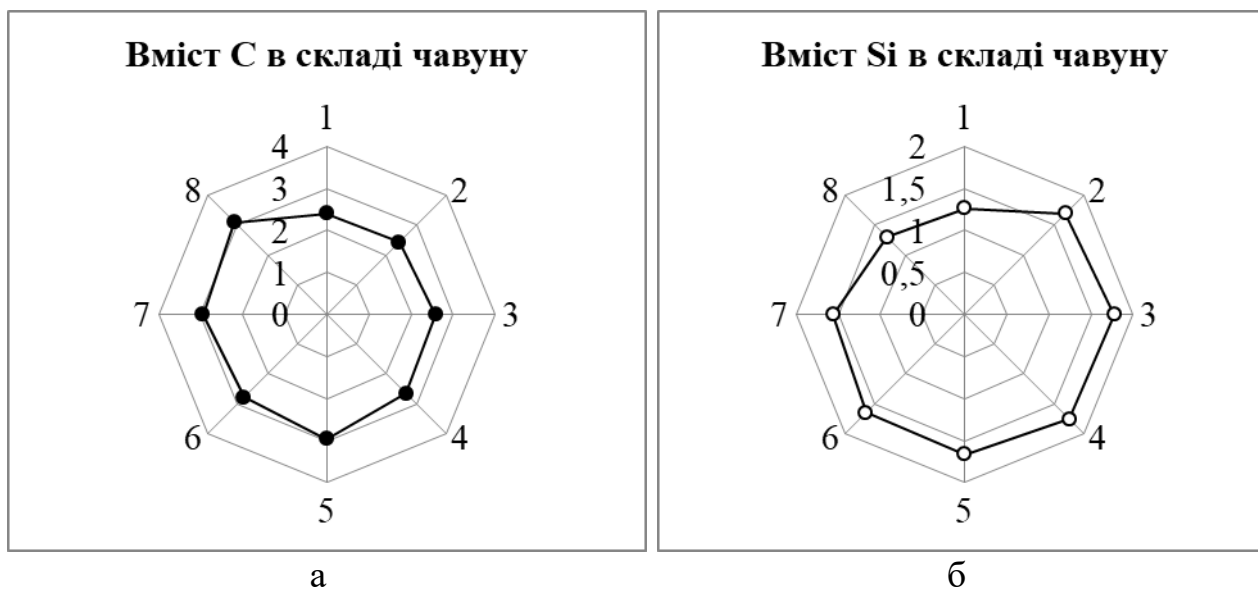


Рисунок 5.9 - Вміст вуглецю та кремнію в чавуні

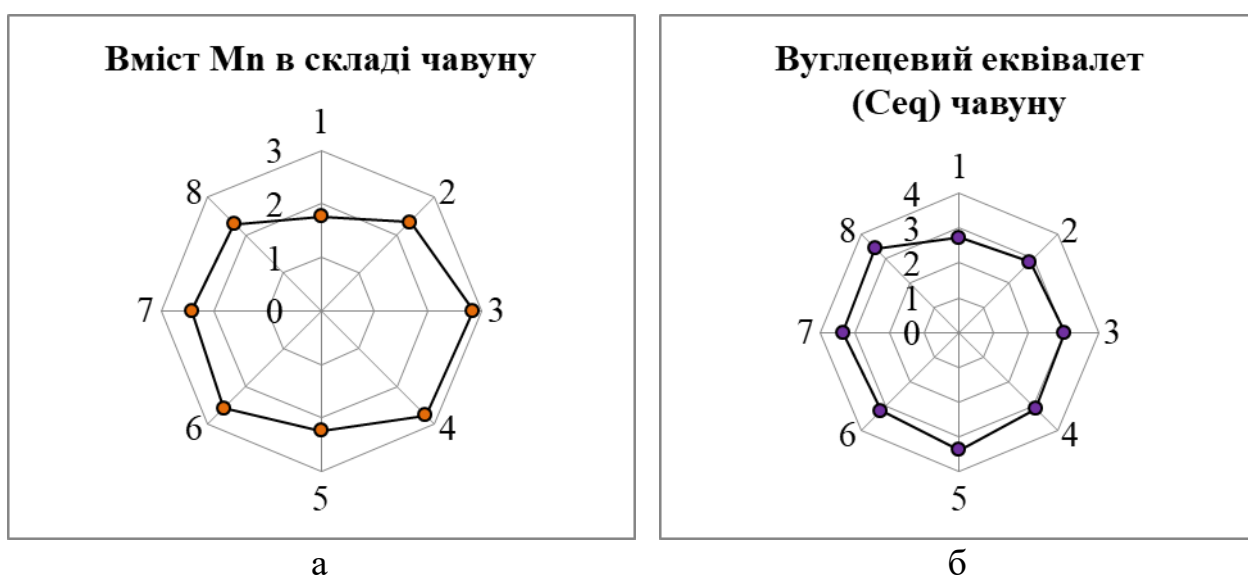


Рисунок 5.10 - Вміст марганцю та вуглецевий еквівалент чавуну

З рис. 5.9 видно, що вміст вуглецю в експериментальних плавках не перевищує 3%, а вміст кремнію не досягає 2%. При цьому вміст марганцю, який є карбідоутворюючим елементом та обраний здала зменшення вуглецевого еквіваленту, не досягає 3%.

На рис. 5.11 наведено розподіл легуючих елементів в чавуні: хрома, нікеля, міді, титану.

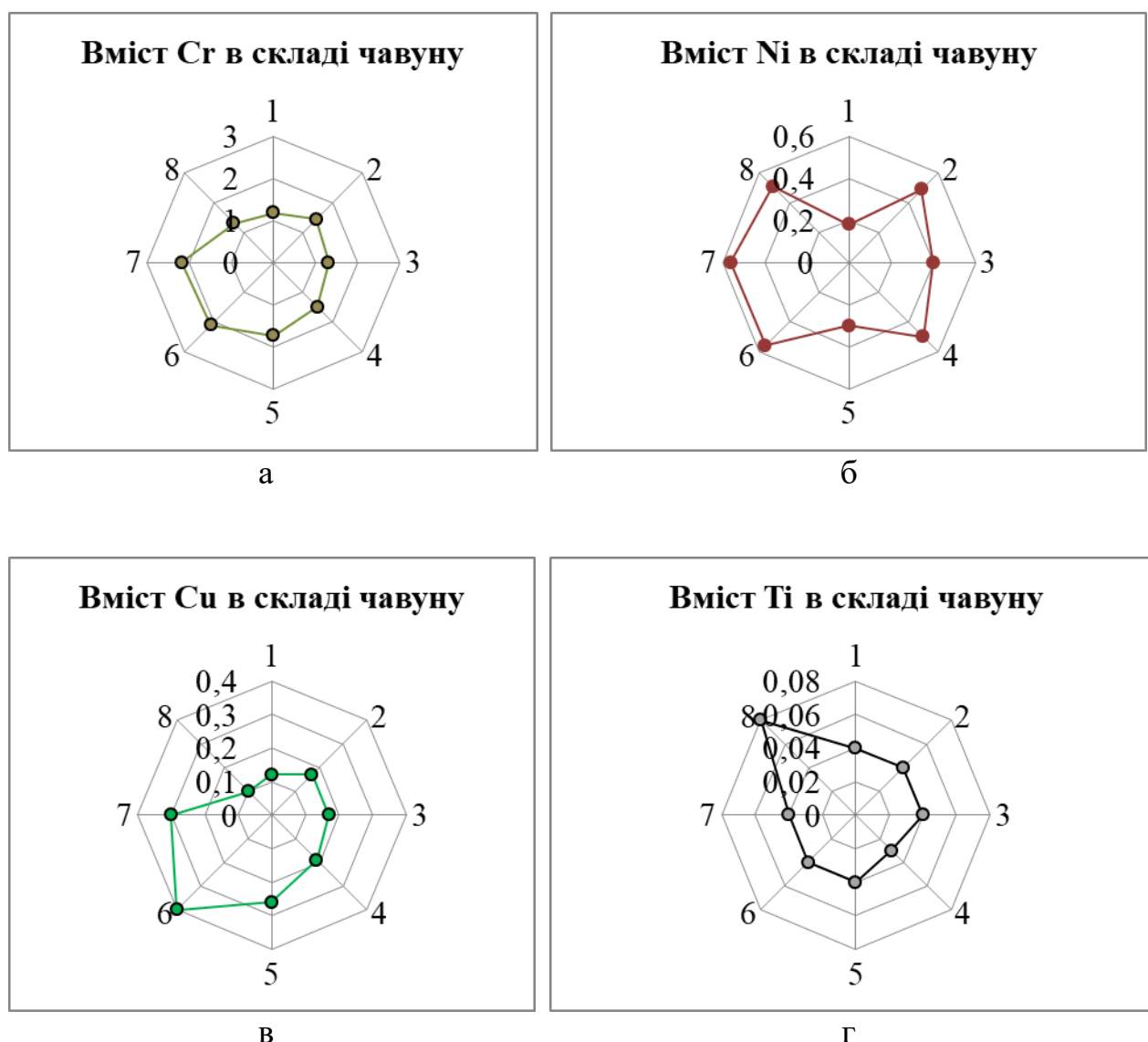


Рисунок 5.11 - Вміст марганцю та вуглецевий еквівалент чавуну

З рис. 5.11 видно, що вміст хрому майже не перевищує 2%, при цьому вміст нікелю є таким, що відношення Cr:Ni трохи вище, ніж прийнято за відомих парктичних рекомендацій Cr:Ni=3:1. В даних плавках це співвідношення складає 3.5:1 – 4.5:1. Вміст міді не є стабільним, що може бути пояснено неконтролюваністю його в складі шихти при виплавці рідкого чавуну як сировини для подальшої переробці на борохромонікелевий чавун. Що стосується вміст титану, то він зменшений, що є позитивним з економічної точки зору. Але для компенсації його з метою підвищення твердості підтримується вміст ванадію на рівні до 0.15% (рис. 5.12) та бору

на рівні $B=0.02-0.03\%$. Це забезпечують прийнятні показники по твердості (рис. 5.13).

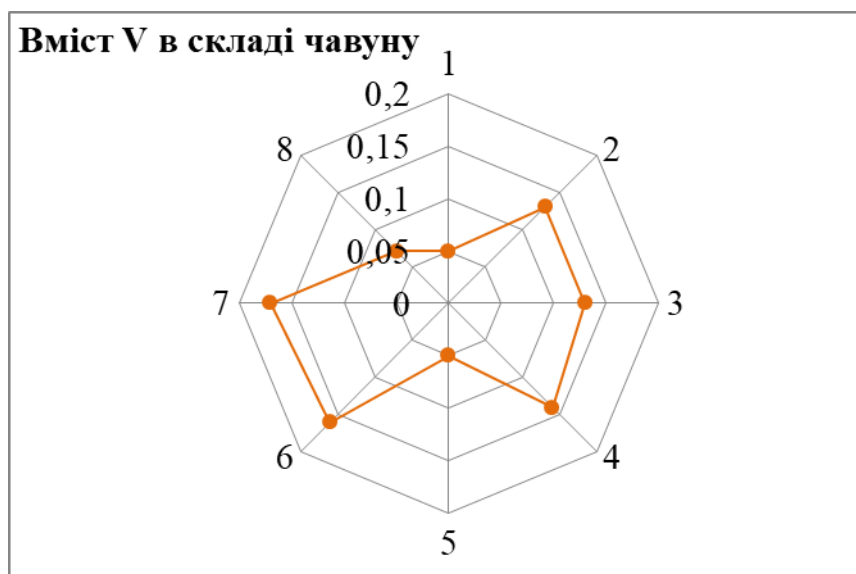


Рисунок 5.12 - Вміст ванадію в борохромонікелеванадієвому чавуні

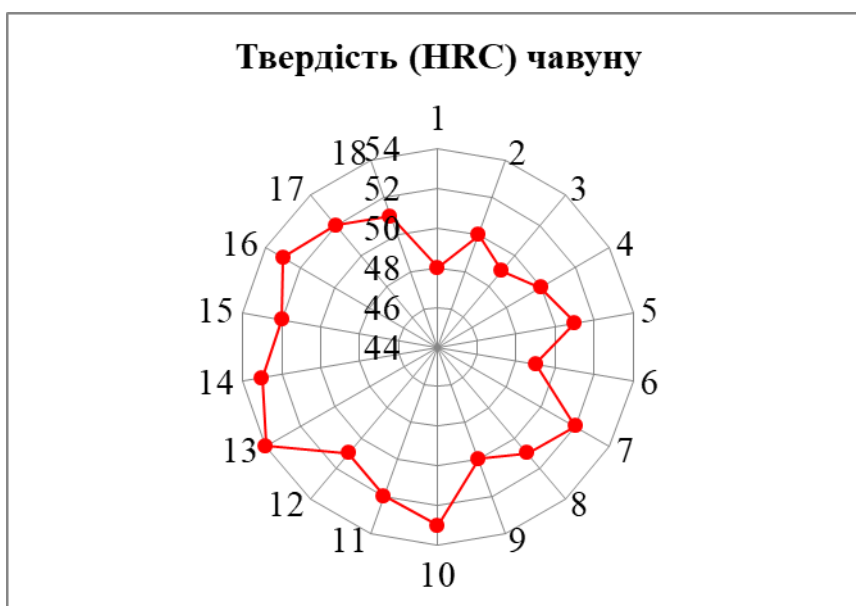


Рисунок 5.13 - Твердість борохромонікелеванадієвого чавуну

В усіх плавках вміст фосфору не перевищував 0.08% , а вміст сірки – 0.06% (рис. 5.14)

В табл. 5.5 наведено результати статистичного аналізу хімічного складу та твердості чавуну, виконані по формулах:

$$HRC_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N HRC_i, \quad (5.1)$$

$$S^2_{HRC} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (HRC_i - HRC_{cp})^2, \quad (5.2)$$

$$CKO_{HRC} = \sqrt{S^2_{HRC}}, \quad (5.3)$$

де HRC_{cp} – середнє значення твердості, S^2_{HRC} – дисперсія твердості, CKO_{HRC} – середнє квадратичне відхилення значень твердості.

Для визначення статистичних показників по хімічному складу формули аналогічні, за виключенням позначень величин (x_i).

Результати розрахунків наведені в табл. 5.5.

Таблиця 5.5 - Результати статистичної обробки даних плавок борохромонікелеванадієвого чавуну

Параметр	Контрольовані показники								
	C, %	Si, %	Mn, %	Ti, %	Cu, %	Cr, %	Ni, %	V, %	B, %
x_{cp}	2,731	1,584	2,406	0,044	0,214	1,596	0,438	0,113	0,022
CKO (S)	0,26	0,2	0,339	0,015	0,1	0,374	0,136	0,049	0,003
$t_{кр}S$	0,61	0,47	0,8	0,04	0,24	0,88	0,32	0,12	0,01
$-\delta/2$	2,52	1,42	2,12	0,03	0,13	1,28	0,32	0,07	0,02
$+\delta/2$	2,95	1,75	2,69	0,06	0,3	1,91	0,55	0,16	0,03

В табл. 5.5 через $t_{кр}$ позначено критичне значення коефіцієнту Стюдента для довірчої ймовірності $P=0.95$, а через $-\delta/2$ та $+\delta/2$ – нижня та верхня межі довірчого інтервалу.

В табл. 5.6 показано значення статистичних характеристик для вуглецевого еквіваленту та твердості чавуну.

Таблиця 5.6 - Значення статистичних характеристик для вуглецевого еквіваленту та твердості чавуну

Параметр	Контрольовані показники	
	C_{eq}	HRC
x_{cp} / HRC_{cp}	3,134	50
$CKO (S)$	0,254	1,309
$t_{кр}S$	0,6	3,1
$-\delta/2$	2,92	49
$+\delta/2$	3,35	51

Отримані результати свідчать про те, що фактична величина твердості відповідає технічним вимогам, що висуваються до чавуну, що призначений для виготовлення лопаток асфальтозмішувачів. Звертає на себе увагу низька величина середнього квадратичного відхилення, тобто можна зробити висновок, що з ймовірністю 95 % твердість борохромонікелеванадієвого чавуну знаходиться в межах $HRC49-HRC51$.

Мікроструктура визначалася на вершині та в основі клинового зразку, бо ці частини виливку тверділи за різної швидкості охолодження. Відповідно важливо було знати, яка структура матриці та форма графіту, а також наявність карбидів.

На рис. 5.15 представлено мікроструктуру чавуну на вершині клинового зразку.



Рисунок 5.15 - Мікроструктура зразку №1 (вершина), $\times 300$

Опис мікроструктури: на вершині зразку №1: графіт вермікулярний дрібнодисперсний, основна структура матриці – перліт з невеликою кількістю ферриту.

На відміну від вершини, в основі зразку визначено наявність окрім вермікулярного ще й кулевидного графіту, матриця складається з приблизно рівних частин перліту та ферриту, причому форма графіту починає змінюватись. Ділянки темного «фльору», що спостерігаються на знімку мікроструктури, в натурі мають жовто-коричневий колір та є ділянками фосфідної евтектики (рис. 5.16)



Рисунок 5.16 - Мікроструктура зразку №1 (основа), $\times 300$

З мікроструктури для зразку №2 випливає, що на вершині визначено включення дрібнодисперсного графіту, а також вермікулярного та кулевидного графіту, а співвідношення перліту та ферриту в металевій матриці складає приблизно співвідношення 70:30.

Окрім цього виявлено фосфідну евтектику, що орієнтована по крупній сітці (рис. 5.17).

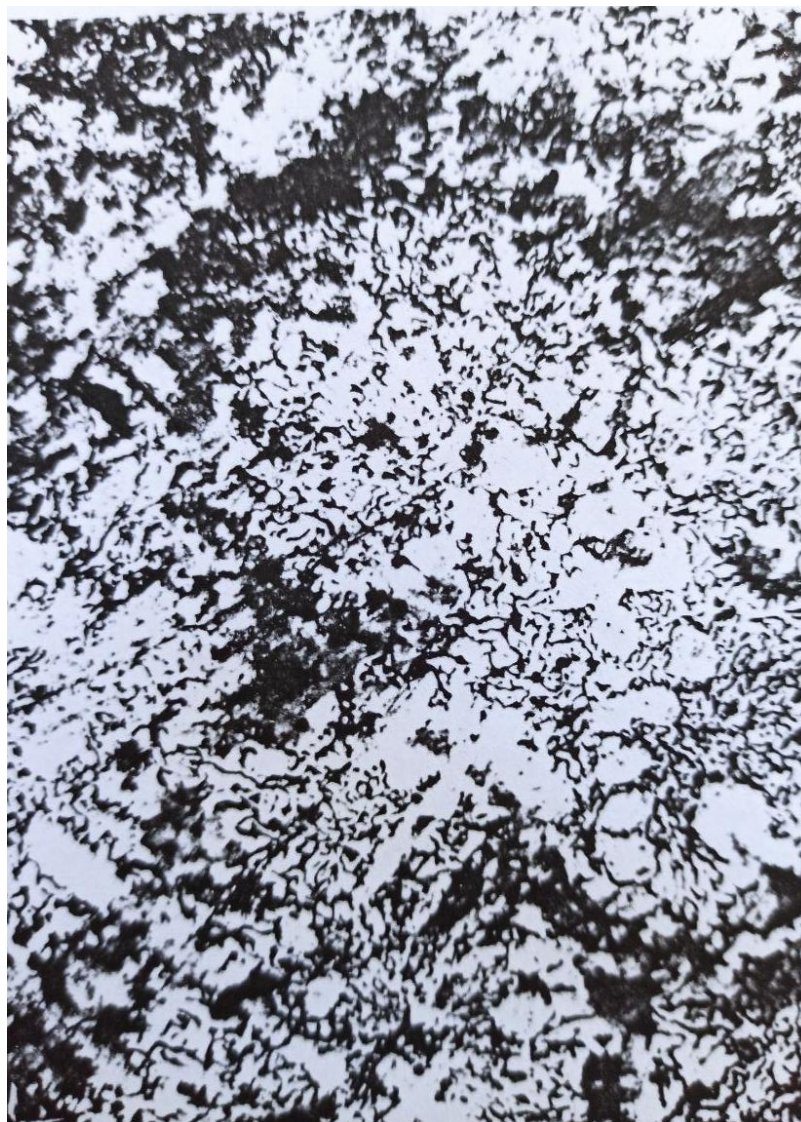


Рисунок 5.17 - Мікроструктура зразку №2 (вершина), $\times 300$

В основі зразку №2 виявлено дисперсність включень вермикулярного та кулевидного графіту, що значно збільшується на ферритних ділянках металевої матриці. На ділянках з перлітом це збільшення виражено не в такій мірі. Орієнтовне співвідношення перліту до ферриту складає близько 40:60 (рис. 5.18).

На вершині зразку №3 виявлено графіт вермикулярний та кулевидний, причому дрібні включення вермикулярного графіту більш спостерігаються на перлітних ділянках, натомість на ферритних ділянках металевої матриці більше кулевидного графіту. Співвідношення перліту до ферриту в матриці

складає близько 60:40. Окрім цього спостерігаються включення фосфідної евтектики (рис. 5.19).

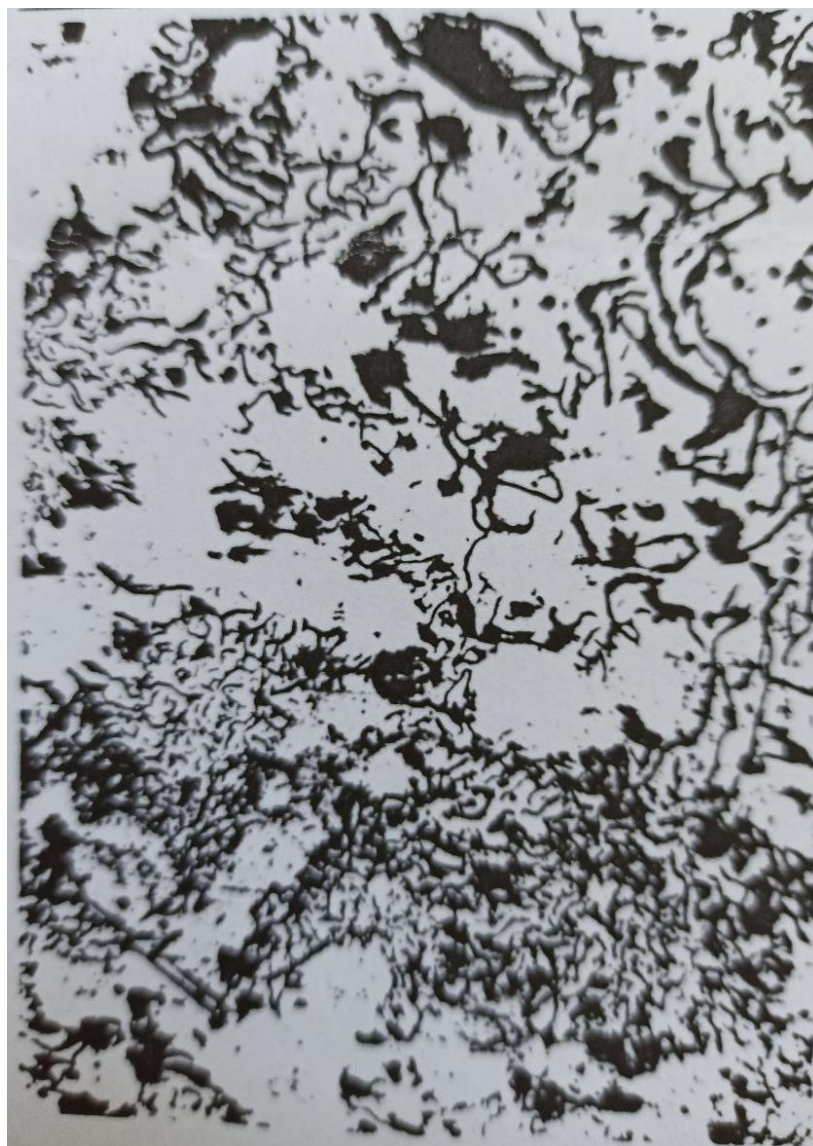


Рисунок 5.18 - Мікроструктура зразку №2 (основа), $\times 300$

З зображення мікроструктури основи на зразку №3 (рис. 5.20) можна побачити, що розміри включень вермикулярного та кулевидного графіту збільшуються, а металева матриця майже повністю ферритна. Кількість перліту складає не більш ніж 7–10%. Спостерігаються також включення фосфідної евтектики.



Рисунок 5.19 - Мікроструктура зразку №3 (вершина), $\times 300$

На вершині зразку №4 (рис. 5.21, а) спостерігаються дрібнодисперсні включення графіту вермикулярної та кулевидної форми за співвідношення в металевій матриці перліту до ферриту близько 50:50.

Окрім цього присутня значна кількість цементиту та спостерігаються ділянки фосфідної евтектики.

На відміну від вершини, в основі зразку цементит не спостерігається, а розміри включень графіту вермикулярної та кулевидної форми збільшуються.

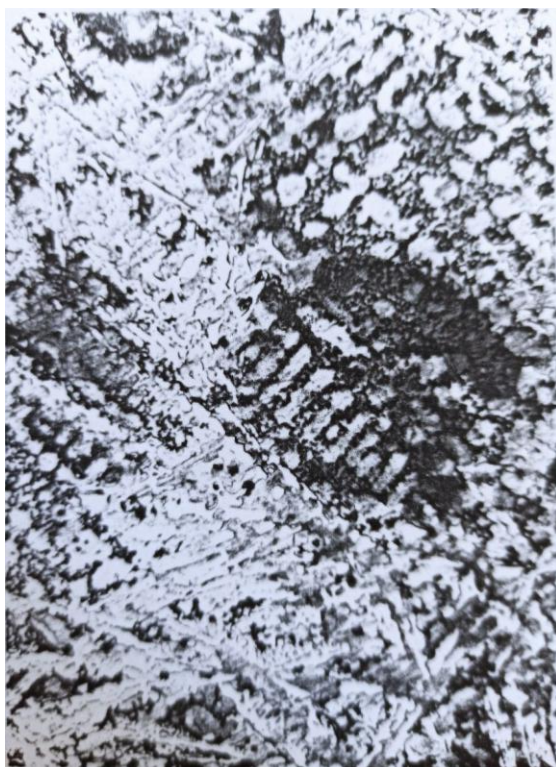
Металева матриця практично ферритна, перліту не більш ніж 7–10% та спостерігається наявність фосфідної евтектики (рис. 5.21, б).



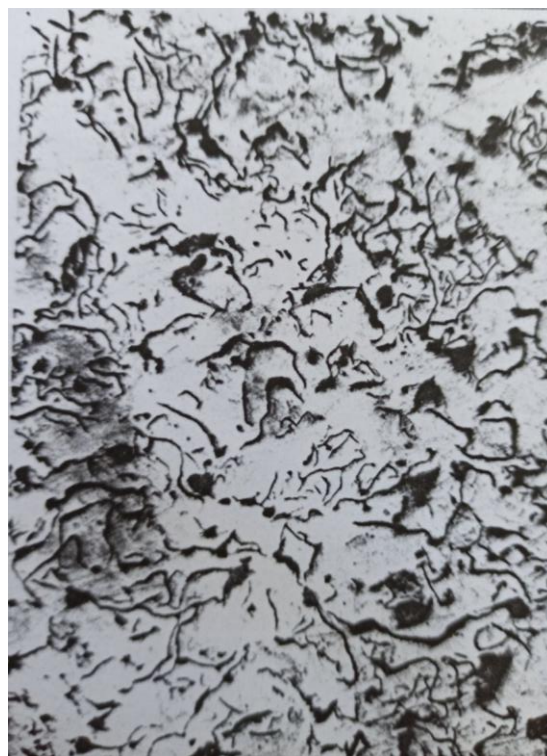
Рисунок 5.20 - Мікроструктура зразку №3 (основа), $\times 300$

На вершині зразку №5 спостерігається кулевидний графіт, причому дисперсність графіту змінюється від вершини до основи. Мікроструктура матриці однакова та представляє собою перліт та цементит різної будови (рис. 5.22, а).

В основі зразку №5 спостерігається перліт та цементит різної будови (рис. 5.22, б).



а



б

Рисунок 5.21 - Мікроструктура зразку №4 (вершина та основа), $\times 300$
(змасштабоване)



а



б

Рисунок 5.22 - Мікроструктура зразку №5 (вершина та основа), $\times 300$
(змасштабоване)

Наведені структури забезпечують зазначені вище значення твердості.

З борохромонікелеванадієвого чавуну виготовляються лопатки асфальтозмішувачів (рис. 5.23).

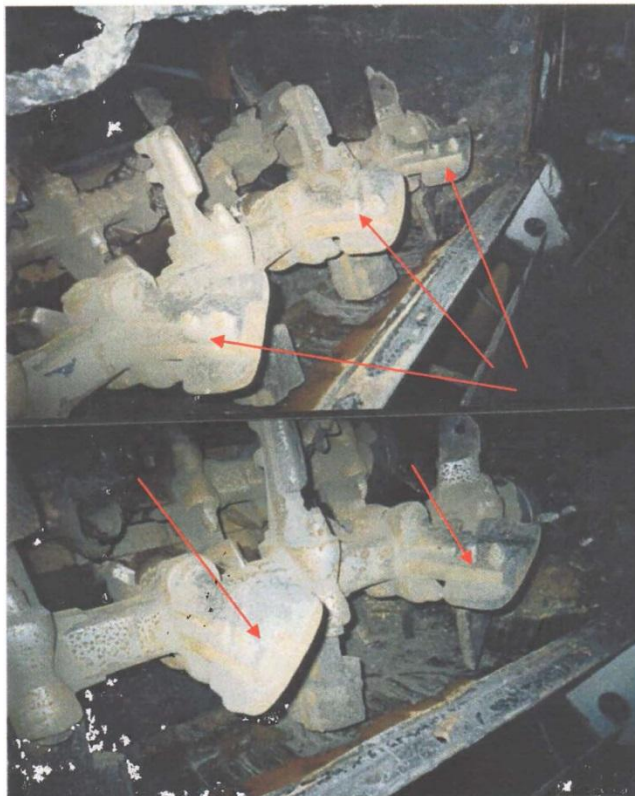


Рисунок 5.23 - Лопатки асфальтозмішувача з борохромонікелеванадієвого чавуну в процесі експлуатації

На рис. 5.24 показано лопатки, виготовлені з базового чавуну (верхній ряд) та з борохромонікелеванадієвого чавуну (нижній ряд) через той самий час знаходження в експлуатації.

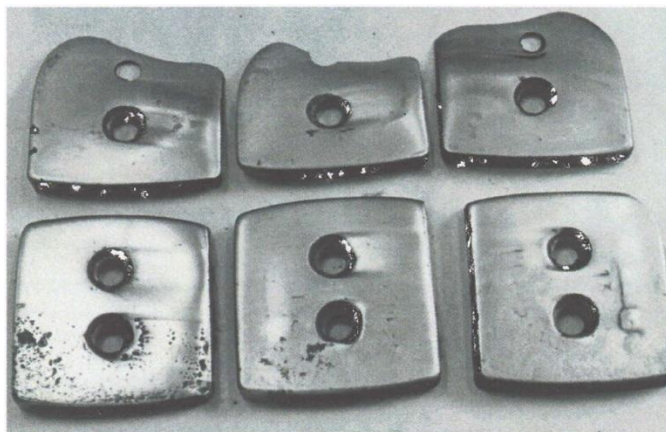


Рисунок 5.24 - Лопатки після експлуатації

З рис. 5.24 видно, що борохромонікелеванадієвий чавун більш стійкий.

Таким чином комплексне легування бором, ванадієм, хромом та нікелем в додаток до легування титаном забезпечує більшу зносостійкість лопаток через більше значення твердості в порівнянні з лопатками які виготовляються лише при легуванні титаном [114]. Такий підхід забезпечує також можливість зменшення абсолютної кількості титану як дорого вартісного елементу, а введення в малих дозах нікелю як графітізуючого елементу дає можливість збалансованого впливу на структуроутворення. При цьому важливо зазначити, що лопатки асфальтозмішувачів не працюють на інтенсивне ударне навантаження як лопатки дробометних апаратів, які розглянуті в роботі [115]. Це означає що обґрунтований хімічний склад, який містить комплекс легуючих елементів в мінімальні кількості, зокрема бор, титан, ванадій [116, 117], забезпечує високу зносостійкість для лопаток асфальтозмішувачів та має потенціал масштабування на лопатки інших змішувачів [118], і рекомендований для практичного використання.

Техніко-економічні обґрунтування стосовно запропонованих рішень можуть базуватися на визначенні витрат феросплавів, що містять запропоновані легуючі елементи, та на експлуатаційних показниках деталей лопаток асфальтозмішувачів. Зважаючи на динаміку цін на ринку, що є процесом постійним, а також на можливість вибору матеріалів від різних постачальників, принцип доцільності та обґрунтованості рішень в

економічній площині має базуватися на наступному. Вартість одного легуючого феросплаву, наприклад при легування лише титаном, що може забезпечити прийнятне значення твердості та зносостійкості, може бути високою. Альтернативне рішення, що полягає у виборі комплексу легуючих елементів та відповідних феросплавів, задля забезпечення необхідних високих показників зносостійкості, взятих в мінімальних кількостях, може бути або вищою, або нижчою. В першому випадку економічний ефект може полягати у значному підвищенні експлуатаційного ресурсу, що має як наслідок підвищення терміну експлуатації без заміни лопаток. В даному випадку за той самий час експлуатації до вимірювання остаточного зносу запропоновані рішення забезпечують знос не більш ніж близько 5-7 % по відношенню до лопаток з базового чавуну, знос лопаток по яким перевищує 60%. В другому випадку обґрунтованість очевидна, бо поряд з підвищенням експлуатаційного ресурсу зменшується ціна.

Висновки до розділу 5.

1. Кращі значення коефіцієнту зносостійкості забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, але вміст титану в чавуні теж має знаходитись в області середніх значень. Це означає, що при збільшенні кількості титану в чавуні чи при його зменшенні, значення коефіцієнту зносостійкості буде зменшуватися.

2. Виявлено неоднозначний вплив твердості чавуну на коефіцієнт зносостійкості, бо максимум першого припадає на мінімум другого. Це свідчить не про пряму залежність коефіцієнту зносостійкості від твердості, а про складний характер такої залежності.

3. Кращі значення межі міцності на розтяг забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, а вміст титану в чавуні треба збільшувати. Слід враховувати, що абсолютний максимум межі міцності на розтяг при збільшенні кількості титану в чавуні визначити неможливо, фактично максимум межі міцності на розтяг чавуну, який може бути досягнутий, знаходиться на межі плану експерименту. Межа міцності на розтяг має характер впливу на неї вуглецю та титану частково як твердість, а частково як коефіцієнт зносостійкості.

4. Краща ударна в'язкість забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, а вміст титану в чавуні треба збільшувати. Зважаючи на обмеженість області планування, слід враховувати, що абсолютний максимум ударної в'язкості при збільшенні кількості титану в чавуні визначити неможливо. Фактично максимум ударної в'язкості чавуну, який може бути досягнутий, знаходиться на межі плану експерименту.

5. Для того щоб обрати раціональний за компромісними критеріями С-Ті комплекс, необхідно вирішувати наступні задачі:

– сформувати загальну систему рівнянь, що описують вплив вуглецю та титану на вихідні змінні,

- обрати допустимі межі значень по кожній вихідній змінній,
- побудувати графічно допустимі області значень вуглецю та титану, що забезпечують компромісні рішення по усіх вихідних змінних.

6. За обраної області вхідних змінних неможливо забезпечити одночасно задані вище умови по твердості та по усіх інших властивостях чавуну, бо відповідні області всередині не перетинаються. Тому треба або зробити пріоритетною вимогою *HRC*, або вимоги по інших трьох вихідних змінних. Іншим рішенням може бути розширення припустимої межі по твердості в бік менших значень, тобто $HRC < 45$. Можна забезпечити одночасно вимоги по σ_b та K_{wr} в доволі широкому діапазоні, або в надто меншому діапазоні одночасне забезпечення вимог по σ_b та a_n . Однак одночасне забезпечення вимог по K_{wr} та a_n не можливе. Коефіцієнт зносостійкості та ударна в'язкість є конфліктними вихідними змінними. Конфліктність властивостей *HRC* та σ_b може бути усунена зменшенням вимоги по величині *HRC*, при цьому буде також усунена конфліктність між *HRC* та K_{wr} , а, ймовірно, й між *HRC* та a_n .

7. Отримані закономірності дозволили обрати напрямок вибору легуючих комплексів, їх кількості та технології виплавки чавуну. При цьому можна орієнтуватись на індукційну плавку синтетичного чавуну, легованого додатково хромом, нікелем, міддю, ванадієм та бором.

8. Встановлено, що вміст вуглецю в експериментальних плавках не перевищує 3%, а вміст кремнію не досягає 2%. При цьому вміст марганцю, який є карбідоутворюючим елементом та обраний здала зменшення вуглецевого еквіваленту, не досягає 3%. Вміст хрому майже не перевищує 2%, при цьому вміст нікелю є таким, що відношення Cr:Ni трохи вище, ніж прийнято за відомих парктичних рекомендацій Cr:Ni=3:1. В даних плавках це співвідношення складає 3.5:1 – 4.5:1. Вміст міді не є стабільним, що може бути пояснено неконтролюваністю його в складі шихти при виплавці рідкого чавуну як сировини для подальшої переробці на борохромонікелевий чавун. Що стосується вміст титану, то він зменшений, що є позитивним з економічної точки зору. Але для компенсації його з метою підвищення

твердості підтримується вміст ванадію на рівні до 0.15% та бору на рівні $B=0.02-0.03\%$. Це забезпечую прийнятні показники по твердості.

9. Фактична величина твердості відповідає технічним вимогам, що висуваються до чавуну, що призначений для виготовлення лопаток асфальтозмішувачів – з ймовірністю 95 % твердість борохромонікелеванадієвого чавуну знаходиться в межах *HRC49–HRC51*. Борохромонікелеванадієвий чавун більш стійкий, ніж базовий чавун.

Зміст розділу відображено у таких наукових публікаціях [116], [117].

Висновки

У дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача розробки проєктно-експериментального підходу в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя.

Отримані наступні основні результати:

1. Одними з основних литих деталей з зносостійкого чавуну є лопатки змішувачів різного функціонального призначення. Обґрунтований вибір матеріалу лопаток не представлений належним чином, що є особливо важливим при проєктуванні змішувачів. Лопатки змішувачів у процесі експлуатації перебувають у стані абразивного тертя і їхня довговічність визначається якістю сплаву, з якого вони виготовлені. Використання легованих сталей для цих цілей вимагає реалізації комплексу технологічних процесів, що мають на меті забезпечити задані характеристики міцності робочої поверхні. Але в якості сплавів можуть бути обрані чавуни, леговані різними елементами: Cr, Ni, Cu, Ti, V. Виготовлення лопаток з білого чавуну може бути кращим, ніж з легованих сталей. Особливо важливим є вибір хімічного складу білого чавуну, що легується, як правило, бором, для надання високих зносостійких властивостей. Однак можна не обмежуватися лише вибором бору як легуючого елемента, а спільно з бором використовувати інші легуючі елементи. Це обґрунтовується тим, що при легуванні низьковуглецевого доєвтектичного чавуну структура його складається переважно з продуктів розпаду аустеніту, ледебуриту, включень карбиду титану та цементиту голчастої будови.

2. Зносостійкість чавуну може бути покращена завдяки рівномірно розподіленому графіту та збільшенню вмісту Mn, що призводить до підвищеною твердості поверхні. При підвищеному вмісті Mn можна досягти максимального зміцнення та зносостійкості в дестабілізованих умовах

шляхом осадження вторинних карбідів та перетворення залишкового аустеніту на мартенсит, що збільшує об'ємну твердість та викликає сили стиску, щоб забезпечити більшу підтримку твердої, але крихкої карбідної фази. Визначено, що шляхом підвищення зносостійкості сплавів є комплексне легування та вибір відповідних технологічних заходів, зокрема таких, що передбачають модифікування при сумісному легуванні нікелем, міддю, хромом, оловом. Це сприяє позитивним результатам по стійкості в умовах тертя в порівнянні із сталями. Для деталей, що працюють в умовах тертя та потребують підвищених вимог до стійкості в експлуатації, можна використовувати високохромистий білий чавун, що має вищу зносостійкість, ніж у сталевих сплавах, яка зумовлена вищою об'ємною часткою карбідів, особливо карбіду типу M_7C_3 , вищою в'язкістю руйнування карбідів, твердішою матрицею та осадженням вторинних карбідів.

3. В якості математичного апарату, що використовується для синтезу сплавів із заданими чи оптимальними властивостями, доцільно використовувати методи побудови математичних моделей типу «склад – властивості». Такі моделі є рівняннями регресії, що описують поверхні відгуку, які можуть бути проаналізовані гребневим аналізом або шляхом перетворення до канонічного вигляду з метою виявлення оптимумів та загального вигляду поверхні відгуку.

4. Отримано математичні моделі для вихідних змінних, які оцінюють якість та експлуатаційні властивості чавуну, що працює в умовах тертя, та мають забезпечувати вимогу зносостійкості. Ці математичні моделі є системою двох рівнянь регресії: $\sigma_b = y_1 = f_1(x_1, x_2, x_3)$ та $K_{wr} = y_2 = f_2(x_1, x_2, x_3)$. Визначено, що вплив вхідних змінних на межу міцності при розтягування та на коефіцієнт зносостійкості є нелінійним. Це означає, що можливий подальший аналіз відповідних залежностей на наявність екстремумів та визначення оптимального хімічного складу за критерієм максимізації межі міцності при розтягування та коефіцієнту зносостійкості. Отримані математичні моделі можуть бути використані практично двома способами:

"конструкторським" та «експлуатаційним». Конструкторський спосіб використовується на етапі проектування деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя, зокрема абразивного, та відповідних вузлів обладнання. Експлуатаційний спосіб використовується в тому випадку, якщо в процесі експлуатації виникає необхідність заміни зношених лопаток і виробниками пропонуються різні партії, що відрізняються за хімічним складом чавуну. У цьому випадку необхідно задаватися експлуатаційними вимогами до механічних властивостей у вигляді діапазонів $\sigma_b \geq [\sigma_b]$, $K_{wr} \geq [K_{wr}]$, де $[\sigma_b]$, $[K_{wr}]$ – мінімально необхідне гарантоване значення межі міцності та коефіцієнта зносостійкості відповідно. Вибирати слід ту партію, яка забезпечує виконання обох цих умов.

5. Оптимізація хімічного складу, виконана за моделлю коефіцієнта зносостійкості, дозволила визначити наступний хімічний склад: C=2.94 %, C_{eq}=3.3 %, Ti=1.56 % – він забезпечує максимум межі міцності $\sigma_b=391$, МПа; C=2.78 %, C_{eq}=3.14 %, Ti=1.61 % – він забезпечує максимум коефіцієнта зносостійкості $K_{wr}=12$ %. Оптимальний хімічний склад за межею міцності забезпечує оптимальність коефіцієнта зносостійкості. Завдяки цьому стає можливим призначати наступний діапазон хімічного складу чавуну: C=(2.78–2.94) %, C_{eq}=(3.14–3.3) %, Ti=(1.56–1.61) % за необхідності одночасного задоволення обох умов оптимальності.

6. Застосування титану в чавуні в кількості 0.28% забезпечує збільшення коефіцієнта зносостійкості на 78–98% залежно від вмісту вуглецю та вуглецевого еквівалента чавуну. Легування сплаву титаном у кількості 1.61% забезпечує максимально можливе значення коефіцієнта зносостійкості. ($K_{wrmax} \approx 12\%$). Проте вплив титану ж двояким та визначається абсолютним його значенням. Оптимальним та рекомендованим хімічним складом чавуну, що забезпечує максимум коефіцієнта зносостійкості, є: C=2.68%, Ti=1.61%, та вміст кремнію у функції вмісту марганцю, що описується лінійним рівнянням виду $Si = a_0 + a_1Mn$, в якому $a_0 = 1.2$, $a_1 = 0.1$.

7. Максимум твердості становить HRC49 за наступного хімічного складу: $C=3.54\%$, $C_{eq}=3.95\%$, $Ti=3.56\%$, однак цей оптимальний склад знаходиться за межами області планування експерименту, а отримане поліноміальне рівняння регресії може бути використане для прогнозування твердості тільки в діапазоні варіювання факторів, вибраних згідно з планом пасивного експерименту. Високі значення твердості чавуну можуть бути отримані і всередині розглянутої області планування, причому при вмісті титану поблизу мінімальних значень: $C=3.34\%$, $C_{eq}=3.727\%$, $Ti=0.73\%$. Це свідчить про те, що поверхня відгуку має складний вигляд, а структура чавуну його складається переважно з продуктів розпаду аустеніту, ледебуриту, включень карбїду титану та цементиту голчастої будови.

8. Визначено, що вуглець і титан впливають на ударну в'язкість протилежно. Збільшення вмісту вуглецю призводить до збільшення ударної в'язкості, тоді як збільшення вмісту титану зменшує її. Ймовірно, це пов'язано з процесами карбїдоутворення, що залежать від співвідношення $C:Ti$ та з урахуванням того, що вплив титану на процеси графітоутворення є двояким. Вуглецевий еквівалент впливає на ударну в'язкість аналогічно вуглецю, проте меншою мірою. При цьому додаткове легування чавуну бором не дозволяє підвищити величину ударної в'язкості, тому не є доцільним. Введення ванадію в чавун у складі модифікатора FeSi40V7 приводить до збільшення твердості чавуну приблизно на 2%. Статистичною перевіркою гіпотези доведено, що з ймовірністю $P=0.9$ вплив ванадію на твердість є суттєвим. Таким чином, використання ванадію у складі FeSi40V7 у межах остаточного вмісту його в чавуні на рівні 0.04–0.078 % може бути доцільним за необхідності підвищення твердості чавуну через сприяння карбїдоутворенню в процесі кристалізації сплаву. Комплексна дія $Ti-V-Cr-Ni-Si$ може позитивно впливати на усі механічні властивості чавуну, зокрема на його твердість та зносостійкість.

9. Встановлено, що якщо за обмеження, що накладається, обрати діапазон області планування $C=(2.21-3.34)\%$ та $C_{eq}=3.183\%$, $Ti=(0.28-2.94)\%$, то можливе існування кількох субоптимальних рішень. Вони складають HRC47...HRC49. При цьому максимум коефіцієнту зносостійкості знаходиться поблизу середині області планування експерименту. Максимум межі міцності на розтяг досягається досягає 390 МПа. При цьому, оптимальні значення вмісту вуглецю та титану становлять 2.82 % та 1.45 % відповідно. Мінімум ударної в'язкості досягає 0.74 МДж/м². При цьому, екстремальні значення вмісту вуглецю та титану становлять 2.88 % та 2.31 % відповідно. Близькі до максимуму значення ударної в'язкості знаходяться ближче до центру плану експерименту.

10. Кращі значення коефіцієнту зносостійкості забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, але вміст титану в чавуні теж має знаходитись в області середніх значень. Це означає, що при збільшенні кількості титану в чавуні чи при його зменшенні, значення коефіцієнту зносостійкості буде зменшуватися. Виявлено неоднозначний вплив твердості чавуну на коефіцієнт зносостійкості, бо максимум першого припадає на мінімум другого. Це свідчить не про пряму залежність коефіцієнту зносостійкості від твердості, а про складний характер такої залежності. Кращі значення межі міцності на розтяг забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, а вміст титану в чавуні треба збільшувати. При цьому межа міцності на розтяг має характер впливу на неї вуглецю та титану частково як твердість, а частково як коефіцієнт зносостійкості. Краща ударна в'язкість забезпечуються при вмісту вуглецю близько до середнього значення, а вміст титану в чавуні треба збільшувати. Абсолютний максимум ударної в'язкості при збільшенні кількості титану в чавуні визначити неможливо, а фактичний максимум ударної в'язкості чавуну, який може бути досягнутий, знаходиться на межі плану експерименту.

11. За обраної області вхідних змінних неможливо забезпечити одночасно задані вище умови по твердості та по усіх інших властивостях чавуну, бо відповідні області всередині не перетинаються. Тому треба або зробити пріоритетною вимогою HRC , або вимоги по інших трьох вихідних змінних. Іншим рішенням може бути розширення припустимої межі по твердості в бік менших значень, тобто $HRC < 45$. Можна забезпечити одночасно вимоги по σ_b та K_{wr} в доволі широкому діапазоні, або в надто меншому діапазоні одночасне забезпечення вимог по σ_b та a_n . Однак одночасне забезпечення вимог по K_{wr} та a_n не можливе. Коефіцієнт зносостійкості та ударна в'язкість є конфліктними вихідними змінними. Конфліктність властивостей HRC та σ_b може бути усунена зменшенням вимоги по величині HRC , при цьому буде також усунена конфліктність між HRC та K_{wr} , а, ймовірно, й між HRC та a_n .

12. На основі проведених промислових експериментальних плавок зносостійкого чавуну в індукційних печах відповідно до обраних напрямів комплексного легування встановлено, що вміст вуглецю в експериментальних плавках не перевищує 3%, а вміст кремнію не досягає 2%. Вміст карбідоутворюючого марганцю не досягає 3%, а вміст хрому майже не перевищує 2%, при цьому вміст нікелю є таким, що відношення $Cr:Ni$ трохи вище, ніж зазвичай прийнято, та складає 3.5:1 – 4.5:1. Вміст міді не є стабільним, а вміст титану зменшений, що є позитивним з економічної точки зору. Для компенсації його з метою підвищення твердості підтримується вміст ванадію на рівні до 0.15% та бору на рівні $B=0.02-0.03\%$. Це забезпечує прийнятні показники по твердості. Фактична величина твердості отриманого борохромонікелеванадієвого чавуну, призначеного для виготовлення лопаток асфальтозмішувачів, відповідає технічним вимогам, бо знаходиться в межах $HRC49-HRC51$, що забезпечує більшу стійкий, ніж базовий чавун.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Говорун Т. П., Дядюра К. О., Пилипенко О. В., Перерва В. І., Вареник С. В., Осічев Д. Р. Фізико-механічні властивості та структурно-фазовий стан зносостійких покриттів на основі нітридів W та Cr. Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету, вип. 88, 2020, т. І. с. 73-79. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.1.73>
2. Golub, G., Myhailovych, Y., Achkevych, O., Chuba, V. (2019). Optimization of angular velocity of drum mixers. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (7 (99)), 64–72. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.166944>
3. Ivanets, V., Borodulin, D., Shushpannikov, A., Suhorukov, D. (2015). Intensification of bulk material mixing in new designs of drum, vibratory and centrifugal mixers. Foods and Raw Materials, 3 (1), 62–69. <https://doi.org/10.12737/11239>
4. Hassanpour, A., Tan, H., Bayly, A., Gopalkrishnan, P., Ng, B., Ghadiri, M. (2011). Analysis of particle motion in a paddle mixer using Discrete Element Method (DEM). Powder Technology, 206 (1-2), 189–194. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2010.07.025>
5. Bohl, D., Mehta, A., Santitissadeekorn, N., Bollt, E. (2011). Characterization of Mixing in a Simple Paddle Mixer Using Experimentally Derived Velocity Fields. Journal of Fluids Engineering, 133 (6). <https://doi.org/10.1115/1.4004086>
6. Gao, W., Liu, L., Liao, Z., Chen, S., Zang, M., Tan, Y. (2019). Discrete element analysis of the particle mixing performance in a ribbon mixer with a double U-shaped vessel. Granular Matter, 21 (1). <https://doi.org/10.1007/s10035-018-0864-4>
7. Li, S., Kajiwar, S., Sakai, M. (2021). Numerical investigation on the mixing mechanism in a cross-torus paddle mixer using the DEM-CFD method. Powder Technology, 377, 89–102. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.08.085>

8. Zaselskiy, V., Shved, S., Shepelenko, M., Suslo, N. (2020). Modeling the horizontal movement of bulk material in the system “conveyor – rotary mixer”. E3S Web of Conferences, 166, 6008.

<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016606008>

9. Reigel, M., Fowley, M., Pickenheim, B. (2012). Evaluation Of Saltstone Mixer Paddle Configuration For Improved Wear Resistance. Office of Scientific and Technical Information (OSTI). <https://doi.org/10.2172/1052403>

10. Blazhko, V., Anishchenko, A., Sayenko, L., Hryhorkiv, O. (2024). Compact complexes for preparing various types of construction mixtures. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, 1 (104), 70. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2024.104.1.70>

11. Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K. (2016). Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2 (5 (80)), 45–49. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.65454>

12. Kostyk, K. (2015). Development of the high-speed boriding technology of alloy steel. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (11 (78)), 8–15. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55015>

13. Lysenkov, V., Demin, D. (2022). Reserves of resource saving in the manufacture of brake drums of cargo vehicles. ScienceRise, 3, 14–23. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002551>

14. Vasenko, Yu. A. (2011). Wear resistance of titanium doped simulation of iron on the data passive experiment. Technology Audit and Production Reserves, 2 (2 (2)), 3–8. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4858>

15. Vasenko, Yu. A. (2012). Technology for improved wear iron. Technology Audit and Production Reserves, 1 (1 (3)), 17–21. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4870>

16. Mykhailo Voron; Anastasiia Semenko; Volodymyr Shemet. Microstructure, mechanical and high temperature properties of cast high Mn low-

density steels alloying by small Lanthanum additions. *Materials Letters*. Volume 355, 15 January 2024, 135421. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135421>

17. Voron M. M., Semenko A. IO., Tymoshenko A. M., & Shemet B. Ж. (2023). Structural-phase characteristics and mechanical properties of TWIP steel Fe-24Mn-11Al-1,4C. *Scientific Technical Journal ‘Metal Science and Treatment of Metals’*, 29(4), 50–57. <https://doi.org/10.15407/mom2023.04.050>

18. Liubych, A. Y., Hovorun, T. P., Marchenko, S. V., Varukha, I. O. (2013). Influence of Titanium on Formation of Wear-Resistant Alloy. *Metallophysics and advanced technologies*, 35 (5), 645-658. <http://jnas.nbu.gov.ua/article/UJRN-0000518013> [In Ukrainian].

19. Fourlakidis, V., Diószegi, A. (2014). A generic model to predict the ultimate tensile strength in pearlitic lamellar graphite iron. *Materials Science and Engineering: A*, 618, 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.08.061>

20. Endo, M., Yanase, K. (2014). Effects of small defects, matrix structures and loading conditions on the fatigue strength of ductile cast irons. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 69, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2013.12.005>

21. Cheng, Y., Huang, F., Li, W., Liu, R., Li, G., Wei, J. (2016). Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete. *Construction and Building Materials*, 118, 164–170. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.020>

22. Demin, D. (2020). Constructing the parametric failure function of the temperature control system of induction crucible furnaces. *EUREKA: Physics and Engineering*, 6, 19–32. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2020.001489>

23. Demin, D. (2017). Strength analysis of lamellar graphite cast iron in the «carbon (C) – carbon equivalent (Ceq)» factor space in the range of C = (3,425-3,563) % and Ceq = (4,214-4,372) %. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (33)), 24–32. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.93178>

24. Domin, D. (2013). Artificial orthogonalization in searching of optimal control of technological processes under uncertainty conditions. *Eastern-European*

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.18452>

25. Naumenko, Y., Deineka, K. (2025). Determining the effect of rotation speed on the energy efficiency of the impact, compression, and abrasion grinding processes in a tumbling mill. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (1 (138)), 41–53. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.343388>

26. Deniz, V. (2013). Comparisons of Dry Grinding Kinetics of Lignite, Bituminous Coal, and Petroleum Coke. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 35 (10), 913–920. <https://doi.org/10.1080/15567036.2010.514591>

27. Góralczyk, M., Krot, P., Zimroz, R., Ogonowski, S. (2020). Increasing Energy Efficiency and Productivity of the Comminution Process in Tumbling Mills by Indirect Measurements of Internal Dynamic – An Overview. *Energies*, 13 (24), 6735. <https://doi.org/10.3390/en13246735>

28. Tavares, L. M. (2017). A Review of Advanced Ball Mill Modelling. *KONA Powder and Particle Journal*, 34, 106–124. <https://doi.org/10.14356/kona.2017015>

29. Kelly, E. G., Spottiswood, D. J. (1982). *Introduction to Mineral Processing*. Wiley.

30. Gupta, A., Yan, D. S. (Eds.) (2016). *Mineral processing design and operations: An introduction*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2014-0-01236-1>

31. King, R. P. (2001). *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/c2009-0-26303-3>

32. Wills, B. A., Finch, J. (2015). *Wills' mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/c2010-0-65478-2>

33. Kwon, J., Jeong, J., Cho, H. (2016). Simulation and optimization of a two-stage ball mill grinding circuit of molybdenum ore. *Advanced Powder Technology*, 27 (4), 1073–1085. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2016.03.016>

34. Dhiman, S., Joshi, R. S., Singh, S., Gill, S. S., Singh, H., Kumar, R., Kumar, V. (2022). Recycling of Ti6Al4V machining swarf into additive manufacturing feedstock powder to realise sustainable recycling goals. *Journal of Cleaner Production*, 348, 131342. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131342>
35. Fraś, E., Górný, M., López, H. F. (2005). The transition from gray to white cast iron during solidification: Part I. Theoretical background. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36 (11), 3075–3082. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0079-2>
36. Fraś, E., Górný, M., López, H. F. (2005). The transition from gray to white cast iron during solidification: Part II. Experimental verification. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36 (11), 3083–3092. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0080-9>
37. Lerner, Y. S. (2003). Overview of ductile iron methods. *Foundry Trade Journal*, 177, 25–27.
38. Poznyak, L. A., Kostenko, G. D., Snezhko, A. A. (1976). Osnovnye napravleniya proizvodstva litikh bimetallov. Lite bimetallicheskix izdelii. IPL AN USSR, Kiev, 3–15.
39. Kostenko, G. D., Pelikan, O. A., Romanenko, Yu. N., Kostenko, D. G. (2006). Hidrodinamicheskie osobennosti processov polucheniya bimetallicheskix ot-livok. *Processy litya*, 1, 69–73.
40. Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O., Fesenko, A. M. (2007). Pat. No. 27681 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferenciyovanimi vlastivostyami. MKP V22D27/00. No. u200707328; declared: 02.07.2007; published: 12.11.2007, Bul. No. 1.
41. Fesenko, A. M., Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O. (2007). Pat. No. 27682 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z rizmimi struk-turoyu i vlastivostyami v zagalnyi livarniy formi z odnogo bazovogo rozplavu. MKP 22D27/00. No. u200707330; declared: 02.07.2007; published: 12.07.2007, Bul. No. 1.
42. Fesenko, A. M., Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O. (2008). Pat. No. 29197 UA. Livnikova sistema dlya vigotovlennya vilivkiv z rizmimi strukturoyu i

vlastivostyami z odnogo bazovogo rozplavu v zagalnij livarnij formi. MKP B22D 27/00. No. 200708456; declared: 23.07.2007; published: 10.01.2008, Bul. No. 1.

43. Kosyachkov, V. O., Fesenko, M. A., Mogilatenko, V. G., Chajkovskij, O. A., Xasan, O. S. (2008). Pat. No. 30511 UA. Sposib modifikuvannya chavunu dlya virobnictva dvosharovix vilivkiv. MKP S21S1/00. No. u200713010; declared: 23.11.2007; published: 25.10.2008, Bul. No. 4.

44. Fesenko, A. M., Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O. (2008). Pat. No. 32662 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijo-vanimi strukturoyu i vlastivostyami. MKP V22D27/00. No. u200800343; declared: 10.01.2008; published: 26.05.2008, Bul. No. 10.

45. Fesenko, A. M., Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O. (2008). Pat. No. 32713 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijo-vanimi strukturoyu i vlastivostyami z odnogo bazovogo rozplavu. MKP V22D27/00. No. u200800725; declared: 21.01.2008; published: 26.05.2008, Bul. No. 10.

46. Fesenko, A. M., Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O., Emelyanenko, K. V. (2008). Pat. No. 33518 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijo-vanimi strukturoyu i vlastivostyami z odnogo bazovogo rozplavu. MKP V22D27/00. No. u200802428; declared: 25.02.2008; published: 25.06.2008, Bul. No. 12.

47. Fesenko, A. M., Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O., Emelyanenko, K. V. (2008). Pat. No. 37319 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijo-vanimi strukturoyu i vlastivostyami. MKP V22D27/00. No. u200807447; declared: 30.05.2008; published: 25.11.2008, Bul. No. 22.

48. Fesenko, M. A., Emelyanenko, K. V. (2009). Pat. No. 42772 UA. Stupinchasta livnikovo-modifikuyucha sistema. MKP V22S9/00. No. u200814693; declared: 22.12.2008, published: 27.07.2009. Bul. No. 14.

49. Fesenko, M. A. (2009). Pat. No. 41783 UA. Stupinchata livnikova sistema dlya modifiku-vannya chavunu v livarnij formi. MKP V22S 9/00. No. u200814684; declared: 22.12.2008; published: 10.06.2009, Bul. No. 11.

50. Fesenko, A. M., Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O., Emelyanenko, K. V. (2009). Pat. No. 42477 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijo-vanimi

strukturoyu i vlastivostyami. MKP V22D27/00. No. u200900188; declared: 12.01.2009; published: 10.07.2009, Bul. No. 13.

51. Fesenko, M. A., Fesenko, A. M., Kosyachkov, V. O., Emelyanenko, K. V. (2009). Pat. No. 42795 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijovanimi strukturoyu i vlastivostyami. MKP V22D27/00. No. u200900009; declared: 05.01.2009; published: 27.07.2009, Bul. No. 14.

52. Fesenko, A. M., Fesenko, M. A., Kosyachkov, V. O., Emelyanenko, K. V. (2009). Pat. No. 41383 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijovanimi strukturoyu i vlastivostyami. MKP V22D27/00. No. u200811908; declared: 07.10.2008; published: 25.05.2009, Bul. No. 10.

53. Fesenko, M. A., Fesenko, A. M., Kosyachkov, V. O. (2010). Pat. No. 51879 UA. Livnikova sistema dlya vigotovlennya vilivkiv z diferencijovanimi strukturoyu i vlastivostyami z odnogo vixidnogo (bazovogo) rozplavu MKP B22D27/00. No. u200913661; declared: 28.12.2009; published: 10.08.2010, Bul. No. 15.

54. Fesenko, M. A., Fesenko, A. M., Kosyachkov, V. O. (2010). Pat. No. 52256 UA. Livnikova sistema dlya vigotovlennya vilivkiv z diferencijovanimi strukturoyu i vlastivostyami z odnogo vixidnogo (bazovogo) rozplavu. MKP B22D27/00. No. u200913741; declared: 28.12.2009, published: 25.08.2010. Bul. No. 16.

55. Fesenko, M. A., Fesenko, A. M., Kosyachkov, V. O. (2010). Pat. No. 54266 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijovanimi strukturoyu i vlastivostyami. MKP V22D27/00. No. u200913097; declared: 16.12.2009; published: 11.11.2010, Bul. No. 21.

56. Fesenko, M. A., Fesenko, A. M., Kosyachkov, V. O. (2010). Pat. No. 54267 UA. Sposib vigotovlennya vilivkiv z diferencijovanimi strukturoyu i vlastivostyami. MKP V22D27/00. No. u200913101; declared: 16.12.2009; published: 11.11.2010, Bul. No. 21.

57. Klymenko, S., Verkhovliuk, A., Sevoian, A., Akimov, O., Ponomarenko, O., & Penziev, P. (2024). Determining rational complex modifying and alloying

additives to improve the mechanical characteristics of gray cast iron. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6, 12 (132), 15–23. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318552>.

58. Fesenko, K., Mogylatenko, V., Fesenko, A., Kosyachkov, V., & Fesenko, M. (2015). Manufacture of two-layers and double-sided iron castings with differential structure and properties. *EUREKA: Physics and Engineering*, 1, 55–60. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2015.0009>

59. Li, X., Liu, J., Xiong, J., Yang, L., Gou, Q., Song, X., Guo, Z., Hua, T., Liang, M. (2020). Wear and corrosion resistant Mn-doped austenitic cast iron prepared by powder metallurgy method. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (3), 6376–6385. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.099>

60. Milosan, I. (2014). The Manufacturing of a Special Wear-resistant Cast Iron Used in Automotive Industry. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, 109, 610–613. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.12.515>

61. Li, Y., Han, P., Chen, C., Zhi, H. (2025). Microstructural evolution and wear mechanism analysis in hot-rolled high-chromium cast iron/carbon steel laminates. *Materials Today Advances*, 28, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2025.100659>

62. An, W.-K., Cai, A.-H., Luo, Y., Chen, H., Liu, W.-X., Li, T.-l., Chen, M. (2009). Optimization of composition of as-cast chromium white cast iron based on wear-resistant performance. *Materials & Design*, 30 (7), 2339–2344. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2008.11.003>

63. Cai, A.-H., Zhou, Y., Tan, J.-Y., Luo, Y., Li, T.-l., Chen, M., An, W.-K. (2008). Optimization of composition of heat-treated chromium white cast iron casting by phosphate graphite mold. *Journal of Alloys and Compounds*, 466 (1-2), 273–280. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2007.11.042>

64. Bedolla-Jacuinde, A., Rainforth, M. W., Mejía, I. (2012). The Role of Silicon in the Solidification of High-Cr Cast Irons. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 44 (2), 856–872. <https://doi.org/10.1007/s11661-012-1434-8>

65. He, Y., Liu, J., Li, Z., Zhou, Y., Ren, X., Guo, J., Yang, Q. (2025). Insights into effect of CeO₂ on microstructures and wear resistance of hypereutectic high chromium cast iron as well as interface properties of CeO₂/M7C₃. *Journal of Rare Earths*. <https://doi.org/10.1016/j.jre.2025.09.007>
66. Bochenek, K., Dlouhy, I., Węglewski, W., Chmielewski, M., Stepanek, R., Cupera, J. et al. (2025). Fracture and wear behavior of high-chromium cast iron obtained from industrial waste and reinforced with alumina particles. *Journal of Materials Research and Technology*, 37, 1579–1595. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.06.109>
67. Wang, S., Liao, X., Zheng, Z., Long, J., Shen, M., Chen, W. et al. (2024). Exploring the hardness-independent wear behavior of typical wear-resistant materials under dynamic and static conditions. *Journal of Materials Research and Technology*, 33, 6798–6809. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2024.11.083>
68. Medyński, D., Janus, A. (2018). Effect of heat treatment parameters on abrasive wear and corrosion resistance of austenitic nodular cast iron Ni–Mn–Cu. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 18 (2), 515–521. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.08.001>
69. Kulkarni, H., Dabhade, V. V. (2019). Green machining of powder-metallurgy-steels (PMS): An overview. *Journal of Manufacturing Processes*, 44, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.05.009>
70. Grądzka-Dahlke, M., Dąbrowski, J. R., Dąbrowski, B. (2007). Characteristic of the porous 316 stainless steel for the friction element of prosthetic joint. *Wear*, 263 (7-12), 1023–1029. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.119>
71. Park, J., Lee, S., Kang, S., Jeon, J., Lee, S. H., Kim, H.-K., Choi, H. (2015). Complex effects of alloy composition and porosity on the phase transformations and mechanical properties of powder metallurgy steels. *Powder Technology*, 284, 459–466. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2015.07.029>
72. Xiong, X., Sheng, H.-C., Chen, J., Yao, P.-P. (2007). Effects of sintering pressure and temperature on microstructure and tribological characteristic of Cu-

based aircraft brake material. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 17 (4), 669–675. [https://doi.org/10.1016/s1003-6326\(07\)60154-x](https://doi.org/10.1016/s1003-6326(07)60154-x)

73. Meesak, T., Thedsuwan, C. (2018). Corrosion behaviours of stainless steel parts formed by powder metallurgy process. Materials Today: Proceedings, 5 (3), 9560–9568. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.10.138>

74. Salahinejad, E., Amini, R., Marasi, M., Hadianfard, M. J. (2010). Microstructure and wear behavior of a porous nanocrystalline nickel-free austenitic stainless steel developed by powder metallurgy. Materials & Design, 31 (4), 2259–2263. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.10.008>

75. Martin, F., García, C., Blanco, Y. (2015). Influence of residual porosity on the dry and lubricated sliding wear of a powder metallurgy austenitic stainless steel. Wear, 328-329, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.01.025>

76. Ranjbar, M., Razavi, S. H., Seyedraoufi, Z.-S., Shajari, Y. (2025). Investigating the effect of optimal addition of Inconel 718 machining swarfs on the wear behavior of gray cast iron. Journal of Materials Research and Technology, 35, 2558–2572. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2025.01.199>

77. Srivastava, R., Singh, B., Saxena, K. K. (2020). Influence of S and Mn on mechanical properties and microstructure of grey cast iron: An overview. Materials Today: Proceedings, 26, 2770–2775. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.577>

78. Wang, B., Pan, Y., Liu, Y., Lyu, N., Barber, G. C., Wang, R. et al. (2020). Effects of quench-tempering and laser hardening treatment on wear resistance of gray cast iron. Journal of Materials Research and Technology, 9 (4), 8163–8171. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.006>

79. Zammit, A., Abela, S., Wagner, L., Mhaede, M., Wan, R., Grech, M. (2016). The effect of shot peening on the scuffing resistance of Cu-Ni austempered ductile iron. Surface and Coatings Technology, 308, 213–219. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.06.089>

80. Wang, B., Pan, Y., Liu, Y., Barber, G. C., Qiu, F., Hu, M. (2020). Wear behavior of composite strengthened gray cast iron by austempering and laser

hardening treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (2), 2037–2043. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.12.036>

81. Mahmoud, E. R. I. (2015). Microstructure, wear and corrosion characteristics of 304 stainless steel laser clad with titanium carbide. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 4 (8), 422–427.

82. Sai, Q., Hao, J., Wang, S., Wang, Z. (2023). Improving the Properties of Gray Cast Iron by Laser Surface Modification. *Materials*, 16(16), 5533. <https://doi.org/10.3390/ma16165533>

83. Zhang, Y., Wang, B., Dong, B., Qiu, F., Barber, G. C., Zou, Q. (2023). Microstructure and Wear Resistance of Gray Cast Iron Synergistically Manipulated by Nano-sized TiC–TiB₂ Ceramic Particles. *Tribology Letters*, 71 (3). <https://doi.org/10.1007/s11249-023-01756-x>

84. Malakizadi, A., Sadik, I., Nyborg, L. (2013). Wear Mechanism of CBN Inserts During Machining of Bimetal Aluminum-grey Cast Iron Engine Block. *Procedia CIRP*, 8, 188–193. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.087>

85. Nejad, S. R., Hosseinpour, M., Mirbagheri, S. M. H. (2024). Interface characterization of Mg-7Al-1Ca alloy reinforced by integrated 3D Cu open-cell foam. *Materials Characterization*, 209, 113687. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2024.113687>

86. Rohani Nejad, S., Mirbagheri, S. M. H. (2024). Fracture Mechanism during Uniaxial Compression of a Novel Metal/Metal Composite with 3D Single Integrated Reinforcement. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 34 (4), 3377–3390. <https://doi.org/10.1007/s11665-024-09297-7>

87. Gowda, D., Kumar, D. C., Sandeep, G. M., Parthasarathy, A., Chandrashekar, S. (2018). Tribological Characterization of Centrifugally Cast Graphite Cast Iron under Dry and Wet conditions. *Materials Today: Proceedings*, 5(1), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.065>

88. Jakubus, A., Soński, M. S. (2019). The Influence of the Shape of Graphite Precipitates on the Cast Iron Abrasion Resistance. *Archives of Foundry Engineering*, 87–90. <https://doi.org/10.24425/afe.2019.129635>

89. Quintero-Ortiz, J., Guerra, F. V., Bedolla-Jacuinde, A., Pacheco-Cedeño, J. S. (2025). Improving the sliding wear and strain behavior of a high-chromium white cast iron modified with Mn and Al. *Wear*, 571, 205877. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2025.205877>
90. Purba, R. H., Kusumoto, K., Shimizu, K., Gaqi, Y. (2025). High temperature abrasive wear characteristics of multicomponent white cast irons. *Materials Chemistry and Physics*, 346, 131341. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2025.131341>
91. Shimizu, K., Kusumoto, K., Yaer, X., Zhang, Y., Shirai, M. (2017). Effect of Mo content on erosive wear characteristics of high chromium cast iron at 1173 K. *Wear*, 376-377, 542–548. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.12.030>
92. Wiengmoon, A., Pearce, J. T. H., Chairuangsi, T. (2011). Relationship between microstructure, hardness and corrosion resistance in 20wt.%Cr, 27wt.%Cr and 36wt.%Cr high chromium cast irons. *Materials Chemistry and Physics*, 125 (3), 739–748. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2010.09.064>
93. Kalantarian, R., Kiayee, N., Farzadi, A., Omidvar, H. (2024). Erosion behavior of various high chromium cast iron alloys exposed to gas-blast stream of ferric oxide particles. *Engineering Failure Analysis*, 163, 108520. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108520>
94. Rêgo, G. C., Drunen, J. V., Matijević, B., de Campos Franceschini Canale, L., Pinto, H. C., Casteletti, L. C. (2024). Effects of niobium and molybdenum addition on microstructural characteristics and wear properties of 14 wt%Cr white cast irons. *Materials Chemistry and Physics*, 317, 129210. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2024.129210>
95. Coronado, J. J. (2011). Effect of load and carbide orientation on abrasive wear resistance of white cast iron. *Wear*, 270 (11-12), 823–827. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2011.02.009>
96. Frolova, L. (2011). Identification provision of energy saving on the basis of audit process moulding machines shaking. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (2 (2)), 8–13. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4859>

97. Demin, D. (2018). Investigation of structural cast iron hardness for castings of automobile industry on the basis of construction and analysis of regression equation in the factor space «carbon (C) – carbon equivalent (Ceq)». Technology Audit and Production Reserves, 3 (1 (41)), 29–36. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2018.109097>
98. Kuryn, M. (2011). Determination of optimum performance liquid glass of magnetization mixtures with liquid glass. Technology Audit and Production Reserves, 2 (2 (2)), 14–20. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2011.4860>
99. Demin, D. (2017). Synthesis of optimal control of technological processes based on a multialternative parametric description of the final state. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (4 (87)), 51–63. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.105294>
100. Demin, D. (2013). (2013). Adaptive modeling in problems of optimal control search termovremennoy cast iron. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6 (4 (66)), 31–37. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2013.19453>
101. Kuryn, M. (2012). Synthesis of cold-hardening mixtures with given set of properties and optimization of technological regimes of their manufacturing. Technology Audit and Production Reserves, 1 (1 (3)), 25–29. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2012.4872>
102. Chibichik, O., Sil'chenko, K., Zemliachenko, D., Korchaka, I., Makarenko, D. (2017). Investigation of the response surface describing the mathematical model of the effects of the Al/Mg rate and temperature on the Al-Mg alloy castability. ScienceRise, 5 (2), 42–45. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.101923>
103. Makarenko, D. (2017). Investigation of the response surfaces describing the mathematical model of the influence of temperature and BeO content in the composite materials on the yield and ultimate strength. Technology Audit and Production Reserves, 3 (3 (35)), 13–17. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.104895>

104. Demin, D. (2017). Synthesis of nomogram for the calculation of suboptimal chemical composition of the structural cast iron on the basis of the parametric description of the ultimate strength response surface. *ScienceRise*, 8, 36–45. <https://doi.org/10.15587/2313-8416.2017.109175>

105. Akimov, O., Penzev, P., Marynenko, D., & Saltykov, L. (2018). Identification of the behavior of properties of a cold-hardening glass-liquid mixture with propylene-carbonate different in dosing components. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (3 (46)), 4–9. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.169748>

106. Demin, D. (2019). Development of «whole» evaluation algorithm of the control quality of «cupola – mixer» melting duplex process. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (1 (47)), 4–24. <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2019.174449>

107. Frolova, L., Shevchenko, R., Shpyh, A., Khoroshailo, V., Antonenko, Y. (2021). Selection of optimal Al–Si combinations in cast iron for castings for engineering purposes. *EUREKA: Physics and Engineering*, 2, 99–107. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001694>

108. Stanovska, I., Duhanets, V., Prokopovych, L., Yakhin, S. (2021). Classification rule for determining the temperature regime of induction gray cast iron. *EUREKA: Physics and Engineering*, 1, 60–66. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001604>

109. Penziev, P., Lavryk, Y. (2023). Diagnostics of the temperature condition of cast iron melting in induction furnaces by the content of SiO₂ and CaO in slag. *ScienceRise*, 1, 14–20. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003558>

110. Nikolaiev, D., Selivorstov, V., Dotsenko, Y., Dzevochko, O., Pereverzieva, A., Dzevochko, A. (2025). Identification of temperature in cupola furnace based on the construction of the “slag composition – slag viscosity” model. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (81)), 29–33. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.322458>

111. Nikolaev, D., Selivorstov, V., Dotsenko, Y., Osypenko, I., Kuznetsow, E. (2025). Determination of conditions for preventing chemical wear of induction furnace lining in the “cupola furnace – induction furnace” duplex process. *Technology Audit and Production Reserves*, 6 (1 (86)), 43–47. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.345473>
112. Dymko, I., Muradian, A., Leheza, Y., Manzhula, A., Rudkovskyi, O. (2017). Integrated approach to the development of the effectiveness function of quality control of metal products. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6 (3 (90)), 26–34. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.119500>
113. Domin, D. O. (2025). *Tekhnolohii ta avtomatyzatsiia metalurhiinoho vyrobnytstva*. Kharkiv: NTU «KhPI», 160.
114. Barsuk, A. (2024). Development of the hardness mathematical model of Ti-alloyed iron for cast parts used in conditions of intensive abrasive friction. *Technology Audit and Production Reserves*, 3 (1 (77)), 6–9. doi: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.301156/>
115. Barsuk, A. (2022). Optimization of the composition of cast iron for cast parts operating under abrasive friction, according to the criterion of maximum wear resistance. *ScienceRise*, 6, 14–20. doi: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002775>
116. Barsuk, A., Makarenko, D., Trenov, M., Sevoian, A. (2024). Identification of regularities of the influence of titanium on the impact toughness of hypoeutectic wear-resistant cast iron and assessment of the efficiency of its additional alloying with boron. *ScienceRise*, 2, 15–23. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003629>
117. Frolova, L., Barsuk, A., Nikolaiev, D. (2022). Revealing the significance of the influence of vanadium on the mechanical properties of cast iron for castings for machine-building purpose. *Technology Audit and Production Reserves*, 4 (1 (66)), 6–10. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.263428>
118. Kharchenko, S., Barsuk, A., Karimova, N., Nanka, A., Pelypenko, Y., Shevtsov, V. et al. (2021). Mathematical model of the mechanical properties of Ti-

alloyed hypoeutectic cast iron for mixer blades. EUREKA: Physics and Engineering, 3, 99–110. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001830>

ДОДАТОК А
СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Барсука Андрія Сергійовича

Наукові праці, які відображають основні наукові результати дисертації.

Статті у виданнях, які включені до наукометричних баз Scopus:

1. Kharchenko S., Barsuk A., Karimova N., Nanka A., Pelypenko Y., Shevtsov V. et al. Mathematical model of the mechanical properties of Ti-alloyed hypoeutectic cast iron for mixer blades. *EUREKA: Physics and Engineering*. (2021). № 3, P. 99–110. (Scopus).

URL: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2021.001830>

2. Frolova L., Barsuk A., Nikolaiev D. Revealing the significance of the influence of vanadium on the mechanical properties of cast iron for castings for machine-building purpose. *Technology Audit and Production Reserves*. (2022). №4 (1 (66)), P. 6–10. (Scopus, Україна, А).

URL: <http://doi.org/10.15587/2706-5448.2022.263428>

(Наказ МОН № 1346 від 10.10.2025, А, Scopus).

3. Barsuk A. Development of the hardness mathematical model of Ti-alloyed iron for cast parts used in conditions of intensive abrasive friction. *Technology Audit and Production Reserves*. (2024). №3 (1 (77)), P. 6–9. (Scopus, Україна, А).

URL: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.301156>

(Наказ МОН № 1346 від 10.10.2025, А, Scopus).

Статті у зарубіжних наукових виданнях:

4. Barsuk A. Optimization of the composition of cast iron for cast parts operating under abrasive friction, according to the criterion of maximum wear resistance. *ScienceRise*. (2022). №6, P. 14–20. (зарубіжне видання).

URL: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2022.002775>

5. Barsuk A., Makarenko D., Trenov M., Sevoian A. Identification of regularities of the influence of titanium on the impact toughness of hypoeutectic

wear-resistant cast iron and assessment of the efficiency of its additional alloying with boron. ScienceRise. (2024). №2, P. 15–23. (зарубіжне видання).

URL: <http://doi.org/10.21303/2313-8416.2024.003629>

Опубліковані праці апробаційного характеру:

6. Барсук А. С., Дьомін Д. О. Підвищення зносостійкості чавунних виливків для роботи в умовах абразивного тертя. XXI Міжнародна науково-практична конференція *«Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. MicroCAD-2023»*

7. Барсук А. С. Вплив складу чавуну для литих деталей, що працюють в умовах абразивного тертя, на зносостійкість. XIX міжнародна науково-практична конференція *«ЛИТВО. Металургія. 2023»*, 10-12 жовтня 2023 року.

8. Барсук А. С. Визначення твердості ті-легованого чавуну для виливків з підвищеними вимогами до зносостійкості. XXII Міжнародна науково-практична конференція *«ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ: НАУКА, ТЕХНІКА, ТЕХНОЛОГІЯ, ОСВІТА, ЗДОРОВ'Я. MicroCAD-2024»*.

9. Барсук А. С. Визначення твердості доєвтектичного зносостійкого Ті-легованого чавуну для деталей, що експлуатуються в умовах абразивного тертя. XX Ювілейна міжнародна науково-практична конференція *«Литво 2024»* XIII Міжнародної науково-практичної конференції металургія 2024, 28 – 30 травня 2024 р.

10. Барсук А. С., Дьомін Д. О. Синтез складу чавуну, легovanого титаном, за критерієм максимуму коефіцієнту зносостійкості. Збірник тез XVII Міжнародної науково-технічної конференції *«НЕМЕТАЛЕВІ ВКРАПЛЕННЯ І ГАЗИ У ЛИВАРНИХ СПЛАВАХ»*, Запоріжжя, 26-27 листопада 2024 року, с. 68–70.

11. Барсук А. С. Закономірності впливу титану на ударну в'язкість доєвтектичного зносостійкого чавуну [Електронний ресурс] / А. С. Барсук // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я =

Information technologies: science, engineering, technology, education, health : тези доп. 33-ї міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2025, 14-17 травня 2025 р. / ред. Є. І. Сокол ; уклад. Г. В. Лісачук ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.]. – Електрон. текст. дані. – Харків : НТУ "ХПІ", 2025 – С. 366.

URI <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90367>

12. Барсук А. С. Оцінка ефективності додаткового легування доевтектичного зносостійкого чавуну бором [Електронний ресурс] / А. С. Барсук // Литво. Металургія. 2025 = Foundry. Metallurgy. 2025 : матеріали 21-ї Міжнар. наук.-практ. конф., 27-29 травня 2025 р. / Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т" [та ін.] ; заг. ред. О. І. Пономаренко. – Електрон. текст. дані. – Харків; Київ, 2025. – С. 29-30. – URI:

<https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/90470>

13. Барсук А. С. Систематизовані ретроспективні дані щодо показників ефективності індукційної плавки. XIX Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів «Теоретичні та практичні дослідження молодих вчених» (19–21 листопада 2025 року): матеріали конференції / за ред. проф. Є.І. Сокола. – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – 881, с. 783-784.

https://iiii-my.sharepoint.com/:b:/g/personal/dmytro_danylchenko_khpi_edu_ua1/ETq1FyBwdhtEv18YLjEYxvsBu5-ALBUC904NsdcdbdSwejw?e=FPI8yk

14. Барсук А.С. Хімічний склад та твердість комплексно легованого зносостійкого чавуну за даними промислових плавов. Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXXIV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2026. Харків: НТУ «ХПІ», 462. Available at: <https://zenodo.org/records/2020545>

15. Барсук А.С. Визначення можливостей забезпечення комплексних вимог по властивостям зносостійкого чавуну. *Литво. Металургія. 2026*: Матеріали XXII Міжнародної науково-практичної конференції. Харків: НТУ «ХПІ», 2026. С. 26–27.

ДОДАТОК Б

ДОВІДКА ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ В НАВЧАЛЬНИЙ ПРОЦЕС

ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор з науково-педагогічної роботи

НТУ «ХП»

Руслан МИГУЩЕНКО



«16» грудня 2025 р.

АКТ

Впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи «Проектно-експериментальний підхід в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя» здобувача наукового ступеня доктора філософії аспіранта кафедри ливарного виробництва НТУ «ХП» Барсука Андрія Сергійовича.

У період з 1 грудня по 15 грудня 2025 року комісія у складі голови завідувача кафедри, професора Пономаренко О. І., професора Акімова О. В. та доцента Берлізева Т. В. провела роботу по визначенню результатів використання науково-методичних положень дисертаційного дослідження Барсука А. С. в навчальному процесі при підготовці фахівців НТУ «ХП».

Матеріали дисертаційної роботи, в якій розроблено проектно-експериментальний підхід в розробці технологічних заходів підвищення зносостійкості чавуну для виливків, що працюють в умовах абразивного тертя використовуються в навчальному процесі НТУ «ХП» при підготовці студентів спеціальності «Металургія» за освітніми компонентами «Інноваційні основи металургії» та «Автоматизація металургійного виробництва». Це дало можливість забезпечити підвищення рівня як теоретичної, так і практичної підготовки студентів.

Голова комісії:

Члени комісії:

Ольга ПОНОМАРЕНКО

Олег АКИМОВ

Тетяна БЕРЛІЗЄВА