

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
«ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ»

**ВОЛЧУК Володимир Миколайович**



УДК 621.771.073:620.178:669.018.256

**РОЗРОБКА НАУКОВИХ ОСНОВ ФОРМУВАННЯ ТА ОЦІНКИ  
МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ СОРТОПРОКАТНИХ ЧАВУННИХ  
ВАЛКІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ЗНОСОСТІЙКОСТІ**

05.02.01 – матеріалознавство

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Дніпропетровськ – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі матеріалознавства та обробки матеріалів в Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий консультант:** Лауреат державної премії України в галузі науки і техніки, Заслужений діяч науки і техніки України, доктор технічних наук, професор **БОЛЬШАКОВ Володимир Іванович**, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», завідувач кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів, ректор.

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор **КУЦОВА Валентина Зіновіївна**, Національна металургійна академія України, завідувач кафедри матеріалознавства ім. Ю.М. Тарана-Жовніра;

доктор технічних наук, професор **КАЛІНІНА Наталія Євграфівна**, Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара, професор кафедри технології виробництва;

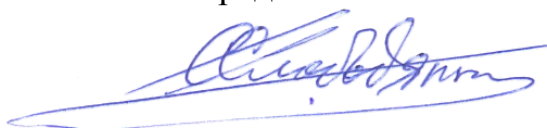
доктор технічних наук, професор **ТОГОБИЦЬКА Дар'я Миколаївна**, Інститут чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, завідувач відділу фізико-хімічних проблем металургійних процесів.

Захист відбудеться « 21 » травня 2015 р. о 12 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.085.02 при Державному вищому навчальному закладі «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського 24-а, ауд. 202.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Державного вищого навчального закладу «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» за адресою: 49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського 24-а.

Автореферат розісланий « 20 » квітня 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради  
д.т.н., професор



С.О. Слободянюк

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Сутність науково-прикладної проблеми.** У роботі вирішена актуальна науково-практична проблема підвищення зносостійкості сортопрокатних чавунних валків із застосуванням системного підходу, що базується на розробці та впровадженні математичних моделей оцінки критеріїв якості в залежності від хімічного складу, параметрів структури та експлуатаційних факторів.

Практичним результатом вирішення даної проблеми є розробка методики прогнозу критеріїв якості сортопрокатних (С) чавунних валків з пластинчатою (П) та кулястою (Ш) формами графіту, легованих хромом (Х) та нікелем (Н) (СПХН та СШХН) з мінімальними матеріально-часовими витратами та з точністю, що задовольняє технічним вимогам. Такий підхід дозволив розробити склади валків зі стабільними показниками критеріїв якості робочої зони металевих бочок та з можливістю їх коригування відповідно до прийнятої технології виробництва.

**Актуальність теми.** Вихід металургійного комплексу України на перспективні ринки Європи ініціює випуск високоякісної продукції із заданими властивостями й конкурентно спроможними ціновими показниками. Вимоги замовника на виробництво металопродукції з підвищеними показниками якості ініціює розвиток і розробку нових підходів, що дозволяють у стислий термін в заводських умовах проводити контроль та коригування якості виробів.

Особливо гостро ця проблема стоїть при оперативній оцінці механічних властивостей масивних металевих виливків, зокрема, прокатних валків. Аналіз традиційних методик визначення механічних властивостей валків, включаючи методи неруйнівного контролю, кількісної металографії, математичних моделей показує, що на сьогоднішній день вони дають задовільну оцінку, що інколи розходиться з вимогами замовника по прогнозу властивостей. Це пов'язане з тим, що реалізувати найбільш очевидний, детермінований підхід, що застосовують для оцінки механічних властивостей валків, заснований на аналізі причинно-наслідкових зв'язків і відносин, не представляється можливим, оскільки технологія виробництва прокатних валків є наскрізною та представляє собою багатопараметричний процес. Тому, на якість валкового чавуну значною мірою впливає велика кількість параметрів технології (хімічного складу, включаючи легуючі елементи і модифікатори, умови охолодження, товщини намазки форми, способу лиття та ін.), що визначають формування структури та пов'язані між собою. Навіть незначна зміна параметрів технології може привести до суттєвої зміни механічних і службових властивостей валків у широкому діапазоні. Однак діюча нормативно-технічна галузева документація регламентує тільки рівень твердості прокатних валків, вимоги до характеристик міцності, в'язких властивостей та зносостійкості не обумовлені. Існують методи відбору проб для визначення тільки твердості, що передбачає стандарт і забезпечується литою пробою і пробою від торця бочки, оскільки вони відрізняються умовами кристалізації. Тому важливим аспектом є забезпечення стабільних показників якості валкового чавуну, у першу чергу його зносостійкості, без проведення додаткових випробувань та з мінімальними матеріально-часовими витратами.

Аналіз технології виробництва та експлуатації прокатних валків і фундаментальних робіт відомих вчених А.Е. Кривошеєва, Т.С. Скобло, К.П. Буніна,

Ю.М. Тарана-Жовніра, М.А. Будагьянца, В.З. Куцовой, В.Є. Хричикова, В.Т. Калініна та ін., свідчить про те, що одним з перспективних підходів для вирішення проблеми оперативної, необхідної для практичних цілей, оцінки якісних характеристик масивних чавунних виливків, зокрема прокатних валків, з мінімальними витратами, є методика, що заснована на створенні математичних моделей прогнозу цих характеристик в залежності від хімічного складу, параметрів структури та експлуатаційних факторів.

З огляду на вище викладене, підвищення зносостійкості прокатних валків є актуальною і важливою науково-практичною проблемою, яка може бути вирішена із застосуванням системного підходу, що базується на розробці та впровадженні математичних моделей оцінки критеріїв якості в залежності від хімічного складу, параметрів структури та експлуатаційних факторів. Такий підхід дозволяє не тільки здійснювати прогнозування і коригування показників якості валків у процесі виробництва, але й досягати їх поліпшення шляхом оптимізації складу, що приведе до підвищення експлуатаційних характеристик.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалася відповідно до напрямків науково-дослідних робіт з госпдогвірної і держбюджетної тематики кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів Державного вищого навчального закладу “Придніпровська державна академія будівництва та архітектури” (ДВНЗ ПДАБА): „Дослідження структурних перетворень у вуглецевих і низьколегованих будівельних сталях при термомеханічній обробці і газотермічних покриттів” (№ державної реєстрації 0106U005345, 2006-2010 рр.); „Дослідження структури та властивостей, прогноз якісних характеристик і розробка газотермічних покриттів конструкційних матеріалів” (№ державної реєстрації 0111U006483, 2011-2015 рр.), а також на підставі договору на “Створення методики експрес оцінки механічних властивостей бочок чавунних і сталевих валків” (договір №22 від 13.09.2012 р.; замовник Промислове акціонерне товариство “Дніпропетровський завод прокатних валків” (ПАТ ДЗПВ)). Автор являвся відповідальним виконавцем цих робіт.

**Мета і задачі дослідження.** Основною метою роботи є вирішення проблеми підвищення зносостійкості сортопрокатних чавунних валків на підставі створення математичних моделей оцінки критеріїв якості в залежності від хімічного складу, параметрів структури та експлуатаційних факторів.

Для досягнення мети були поставлені наступні наукові задачі:

1. Здійснити аналіз технології виробництва прокатних валків виконань СПХН і СШХН, легованих хромом та нікелем, для створення методики оперативної оцінки їх механічних властивостей і зносостійкості.
2. Провести дослідження впливу хімічного складу та параметрів структури валків виробництва ПАТ ДЗПВ на механічні властивості та зносостійкість.
3. Застосувати експертну оцінку при визначенні зони робочої області для оптимізації хімічного складу по регресійних рівняннях.
4. Визначити область компромісу критеріїв якості прокатних валків (область, де критерії мінімально протирічать один одному).
5. Здійснити прогноз зносостійкості валків на підставі аналізу експлуатаційних параметрів та твердості.

6. Застосувати теорію мультифракталів для прогнозу механічних властивостей валків.
7. Впровадити методи оцінки критеріїв якості робочої зони бочок прокатних валків.

**Об'єкт дослідження** – процес оцінки критеріїв якості сортопрокатних чавунних валків шляхом математичного моделювання.

**Предмет дослідження** – закономірності формування критеріїв якості матеріалу сортопрокатних валків в залежності від хімічного складу, структури та експлуатаційних факторів.

**Методи дослідження.** Дослідження роботи засновані на розробці методів прогнозу якості валкового чавуну, що базуються на аналізі технології виробництва прокатних валків з урахуванням впливу хімічного складу та параметрів структури.

Досліджували чавунні валки виконання СПХН, що містять 2,8...3,5% вуглецю по масі, леговані хромом (0,5...0,8%), нікелем (0,9...1,3%) та міддю (0,2...0,3%); валки виконання СШХН, що містять 2,9...3,25% вуглецю, леговані хромом (0,5...0,8%), нікелем (0,9...1,3%) та модифіковані магнієм (0,038...0,054%). При виготовленні валків використовували модифікатори (Foundrisil, Elmag-600, Elmag-900, V1 57 (M), Varinoc, Elgraf).

Мікроструктуру і механічні властивості промислових валкових чавунів виконань СПХН і СШХН досліджували стандартними методами оптичної мікроскопії і механічних випробувань на стандартизованому обладнанні.

При виконанні роботи використовували методи формування пасивного експерименту і планування активного експерименту, експертних оцінок і регресійного аналізу та мультифрактального аналізу мікроструктури.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає у наступному:

**1. Встановлені зв'язки між механічними властивостями чавунних валків виконань СПХН (41...65) і СШХН (41...50), параметрами їх структури і хімічним складом та розроблена, науково обґрунтована і апробована математична модель оцінки цих властивостей.** В результаті проведення пасивного експерименту, спрямованого на розробку пропозицій по стабілізації технології виробництва валків, визначена робоча область механічних властивостей ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD) робочої зони бочок (до ~50 мм), що описується рівняннями. Математична модель адекватна за критерієм Фішера  $F=1,369$  при рівні значимості  $\alpha=0,05$  – для валків виконання СПХН (вибірка по 320 плавкам загальною масою ~ 930 тонн) та  $F=1,247$  при рівні значимості  $\alpha=0,05$  – для валків виконання СШХН (вибірка по 283 плавкам загальною масою ~ 800 тонн). Для валків виконання СПХН область існування властивостей обмежена наступними межами:  $\sigma_B \approx 220 \div 380$  МПа,  $\sigma_{згин} \approx 390 \div 840$  МПа,  $КС \approx 8 \div 25$  кДж/м<sup>2</sup>,  $HSD \approx 40 \div 70$ ; валків – СШХН:  $\sigma_B \approx 240 \div 460$  МПа,  $\sigma_{згин} \approx 330 \div 940$  МПа,  $КС \approx 9 \div 33$  кДж/м<sup>2</sup>,  $HSD \approx 40 \div 60$  з урахуванням всього діапазону застосованих умов охолодження у металевій формі. Рекомендовано внести дані зміни в діючі галузеві ТУ на валки виконань СШХН і СПХН. Для оперативного використання при здавальних випробуваннях валків також отримані гістограми, що описують ступінь впливу елементів хімічного складу валків на їхні механічні властивості.

**2. Вперше визначено зону робочої області прокатних валків із установленим вмістом легуючих елементів, співвідношенням кількісних параметрів структури, в якій їх критерії якості відповідають стабільним показникам.** Встановлено межі обраних параметрів за хімічним складом і структури валкового чавуну, що забезпечують стабільні показники механічних властивостей. Для валків виконання СПХН: 2,95...3,30% С, 0,91...1,50% Si, 0,54...0,75% Mn, 0,080...0,200% P, 0,004...0,031% S, 0,56...1,20% Cr, 0,80...1,40% Ni, 12...30% карбідів, 0,5...2% пластинчастого графіту, довжина пластинчастого графіту 45...180 ПГд. Для валків виконання СШХН: 3,00...3,40% С, 1,45...1,80% Si, 0,45...0,65% Mn, 0,040...0,200% P, 0,004...0,010% S, 0,60...0,90% Cr, 0,70...1,30% Ni, 0,035...0,056% Mg, 9...25% карбідів, 0,5...2,5% кулястого графіту, діаметр кулястого графіту 45...180 ШГд. Отримано рівняння регресії, що дозволяють визначати  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD валків у виділеній зоні робочої області з похибкою 4,3...8,6%.

**3. Вперше визначено область компромісу із найбільш ефективним поєднанням властивостей ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD) робочої зони бочок валків виконання СПХН, СШХН по встановленим межам вмісту компонентів хімічного складу та параметрів структури.** Область компромісу критеріїв якості визначена на основі даних пасивного експерименту. Реалізація цього методу дозволяє встановлювати пріоритет на комплекс механічних властивостей валка, прогнозувати зміни технологічного процесу та автоматично коригувати його хімічний склад.

**4. Дістала подальший розвиток методика виявлення впливу експлуатаційних характеристик на зносостійкість робочої зони бочок валків виконання СПХН і СШХН.** Реалізовано метод прогнозу зносостійкості валків з похибкою до 6,5%.

**5. Вперше теоретично обґрунтовано та експериментально встановлено чутливість механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків до статистичних розмірностей елементів структури робочої зони бочок.** Найбільші показники чутливості спостерігаються між механічними властивостями чавуну та фрактальними, інформаційними і кореляційними розмірностями карбідів та графіту, що дозволяє розширити уявлення про фрактальну природу елементів структури валкового чавуну. Це дозволило збільшити вірогідність прогнозу властивостей до 20%.

**6. Вперше із застосуванням теорії мультифракталів визначено кореляцію між спектром статистичних розмірностей елементів структури робочої зони бочок сортопрокатних чавунних валків та їх механічними властивостями,** що дозволяє за допомогою отриманих закономірностей прогнозувати ці властивості. Експериментально встановлено, що при збільшенні фрактальної розмірності пластинчастого графіту від  $1,58 \pm 0,06$  до  $1,97 \pm 0,06$  знижуються показники міцності на розрив на 160 МПа, а міцності на згин – на 400 МПа. Показники ударної в'язкості зменшуються з 27 кДж/м<sup>2</sup> до 13 кДж/м<sup>2</sup> при зростанні інформаційної розмірності карбідів від  $1,50 \pm 0,05$  до  $1,99 \pm 0,05$ . При збільшенні фрактальної розмірності кулястого графіту від  $1,50 \pm 0,05$  до 2 підвищуються показники міцності на розрив на 200 МПа, а міцності на згин – на 290 МПа.

**Практичне значення одержаних результатів.** На підставі одержаних результатів впроваджена автоматизована методика оцінки механічних властивостей

прокатних валків виконання СПХН і СШХН на підприємстві ПАТ ДЗПВ, що підтверджено актом впровадження від 14.10.2013 р. і розрахунком очікуваного щорічного економічного ефекту у розмірі 355,2 тис. грн. та розроблена методика прогнозу зносостійкості цих валків з очікуваним щорічним економічним ефектом в розмірі 720 тис. грн.

Практична значимість результатів наступна:

- визначена робоча область механічних властивостей прокатних валків, що описується системою рівнянь, яка дозволяє оперативно контролювати та коригувати хімічний склад чавуну відповідно до прийнятої технології виробництва;
- розроблені та рекомендовані у виробництво на ПАТ ДЗПВ склади досліджуваних валкових чавунів, що забезпечують стабільні механічні властивості робочої зони валків. Рекомендовано внести дані зміни в діючі галузеві ТУ по хімічному складу валків виконань СШХН та СПХН;
- визначені області компромісу механічних властивостей ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD) валків графо-аналітичним методом, що дозволяє, залежно від вибору пріоритету до властивостей, визначати необхідні значення, прогнозувати зміни технологічного процесу і автоматично коригувати хімічний склад валка. Дано рекомендації в діючі галузеві ТУ по найбільш ефективному поєднанню властивостей  $\sigma_b$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD по встановленим межах вмісту компонентів;
- розроблена та програмно реалізована методика прогнозу зносостійкості валків виконань СШХН та СПХН на основі аналізу експлуатаційних характеристик (шляху тертя, питомого тиску, швидкості ковзання) та твердості;
- розроблена методика кількісної оцінки елементів структури прокатних валків із застосуванням теорії мультифракталів, що дозволяє прогнозувати їх механічні властивості;
- для оперативного використання при здавальних випробуваннях валків розроблена та впроваджена на металургійному підприємстві ПАТ ДЗПВ методика прогнозу якості валків у вигляді програмного забезпечення. Відносна похибка методики складає 6,5%.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувач самостійно провів основний обсяг експериментальних досліджень, включаючи математичне планування і розрахунок мультифрактальних розмірностей, обробку й узагальнення отриманих результатів. Виробничі й лабораторні дослідження проведені як самим автором, так і безпосередньо при його участі.

Автор брав участь як відповідальний виконавець або виконавець договірних робіт, результати яких використані в дисертації, впровадженні отриманих результатів у виробництво.

У роботах [3-11, 13, 15, 16] авторів належить ініціатива в постановці мети і завдань дослідження; [12, 14, 19, 23, 32] – узагальнення відомих та отриманих експериментальним шляхом даних, спрямованих на дослідження, що направлені на встановлення впливу хімічного складу і мультифрактальних розмірностей на механічні властивості виробів з металу, зокрема, прокатних валків; [17, 18] – постановка і проведення експериментів, включаючи особливості формування

структури чавунів і їх вплив на властивості, обробка й аналіз результатів досліджень; [1, 2, 20-31] – інтерпретація наукових положень по впровадженню отриманих результатів у виробничий процес.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати досліджень були представлені на: XVI Міжнародній науково-практичній конференції «Фундаментальні і прикладні дослідження, розробка й застосування високих технологій у промисловості та економіці» (Санкт-Петербург, Росія, 2013 р.), IX Міжнародному науково-технічному конгресі термістів і металознавців (Харків, 2008 р.), Міжнародних конференціях Стародубівські читання “Будівництво, матеріалознавство, машинобудування” (Дніпропетровськ, 2004, 2007, 2008, 2012 рр.), Міжнародних конференціях «Моделювання та оптимізація матеріалів» (Одеса, 2004÷2008 рр.), Міжрегіональних семінарах “Проблеми сучасного матеріалознавства” і на засіданнях кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів (ДВНЗ ПДАБА, Дніпропетровськ, 2004÷2015 рр.).

**Публікації.** Основні положення дисертації опубліковані в 32 наукових працях. Серед них: 20 статей у наукових фахових виданнях України (4 з них без співавторів), в тому числі 5 у таких, що внесені до реєстру міжнародних наукометричних баз даних, 1 монографія, 1 патент України на корисну модель, 3 свідоцтва авторського права України на твір, 7 статей та апробацій – у збірниках міжнародних і вітчизняних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається із вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 294 сторінки, включаючи 267 сторінок основного тексту, у тому числі 66 рисунків, 16 таблиць та 4 додатків на 27 сторінках, список використаних джерел містить 334 найменувань на 37 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** розкривається сутність науково-практичної проблеми та обґрунтовано актуальність теми з розробки наукових основ формування та оцінки механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків для підвищення їх зносостійкості, сформульовано мету і завдання дослідження, визначені об'єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну та практичне значення роботи. Зазначено особистий внесок здобувача, публікації та апробацію результатів досліджень.

**Перший розділ** містить аналітичний огляд літературних джерел, присвячених дослідженню аспектів розвитку класичних і сучасних методик і моделей оцінки якості масивних металевих виливків, зокрема прокатних валків, теоретичні передумови одержання валків зі стабільними властивостями, які можуть бути використані при розробці та дослідженні нових методик оперативної оцінки механічних властивостей для підвищення зносостійкості.

Недостатня точність прогнозу механічних властивостей валків обумовлена періодичністю, багатокритеріальністю та багатопараметричністю технології виробництва. Сучасні вимоги замовника на валки з конкретними споживчими властивостями неможливо забезпечити без оперативної оцінки якості ще на стадії їх виробництва. Ці аспекти ініціюють проведення даної роботи, спрямованої на



розробку наукових основ оцінки механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків для підвищення зносостійкості.

В роботі сформульована важлива науково-практична проблема підвищення зносостійкості сортопрокатних чавунних валків, котра може бути вирішена шляхом розробки та впровадження методики прогнозу на основі аналізу експлуатаційних характеристик та механічних властивостей.

В **другому розділі** наведено хімічний склад матеріалів валків (табл. 1) та методики досліджень.

Таблиця 1

Хімічний склад досліджуваних валкових чавунів, відлитих на ПАТ ДЗПВ, в % мас.

Виконання	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu-СПХН; Mg-СПХН
СПХН-43	3,25...3,50	0,75...1,10	0,44...0,70	0,070...0,085	0,009...0,026	0,60...0,75	1,05...1,29	0,20...0,29
СПХН-49	2,92...3,34	0,60...0,80	0,66...0,90	0,100...0,190	0,035...0,066	0,66...0,80	0,89...1,15	0,22...0,26
СПХН-45	2,90...3,12	0,75...0,93	0,63...0,84	0,096...0,115	0,025...0,058	0,62...0,77	1,11...1,20	0,25...0,32
СПХН-45	2,80...2,95	0,65...0,90	0,50...0,76	0,090...0,108	0,020...0,051	0,65...0,79	1,08...1,15	0,23...0,29
СПХН-50	2,90...3,17	1,60...1,97	0,49...0,68	0,045...0,070	0,011...0,019	0,43...0,61	1,00...1,17	0,048...0,052
СПХН-50	3,00...3,30	1,49...1,85	0,48...0,72	0,042...0,066	0,008...0,020	0,35...0,45	1,03...1,27	0,046...0,054
СПХН-50	3,14...3,38	1,43...1,88	0,47...0,60	0,053...0,074	0,010...0,034	0,46...0,54	1,01...1,30	0,050...0,057

Зразки для оптичної мікроскопії (Neophot-2) та механічних іспитів вирізались з поверхневого шару (до ~ 50 мм) відлитих проб та гладких металевих бочок в тангенціальному напрямку. Механічні властивості валкового чавуну визначали на стандартному устаткуванні з використанням сучасних методів і вимірювальної апаратури: машина іспитова «INSTRON», маятниковий копер ПСВ 5, машина іспитова ЦД-40, твердомір – склероскоп Шора. Ударну в'язкість чавуну визначали на зразках без надрізу розміром 10×10×55 мм. Для оцінки рівня міцності на згин використовували зразки 10×10×90 мм, а на розтяг – зразки діаметром 25 мм та довжиною 50 мм.

На рис. 1 наведена мікроструктура робочої зони металевих бочок чавунних валків виконання СПХН.

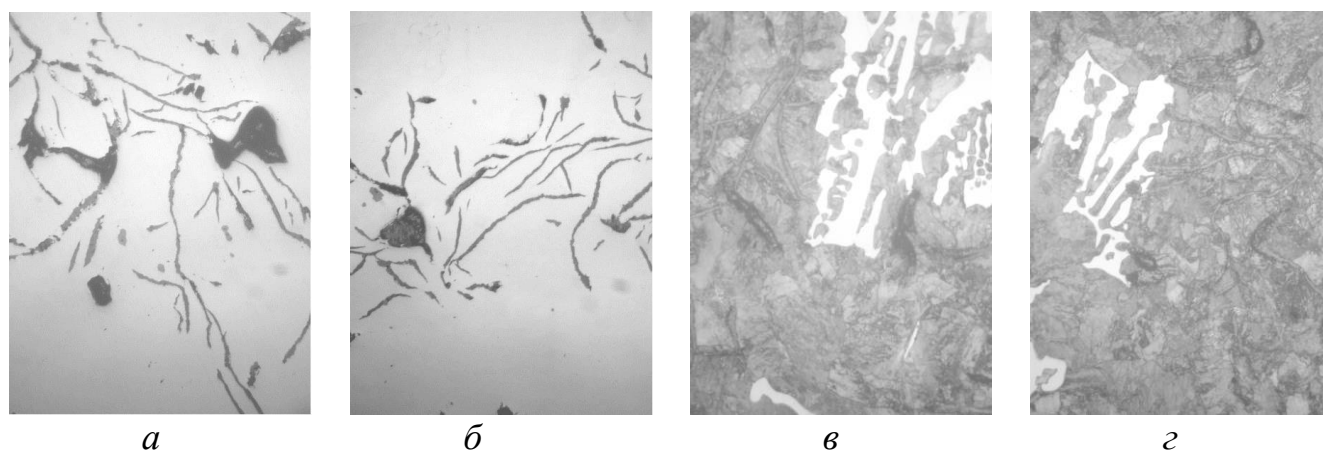


Рис. 1. Мікроструктура чавуну бочки валка виконання СПХН-45 (а, в), СПХН-49 (б, з) на відстані 10 мм від поверхні: форма пластинчатий графіт (а, б); колонії ледеburиту, пластинчатий графіт та перлітна матриця (в, з), ×200

У робочій зоні бочок валків виконання СПХН вміст пластинчастого графіту коливався від 0,5 до 3% з балом ПГд45-ПГд180; кількість ледебуритної евтектики змінювалось від 8% до 37%. Матриця робочої зони бочок валків виконання СШХН (рис. 2) складалася з перліту; вміст ледебуриту – від 6% до 38%; вміст кулястого графіту – до 3,5%.

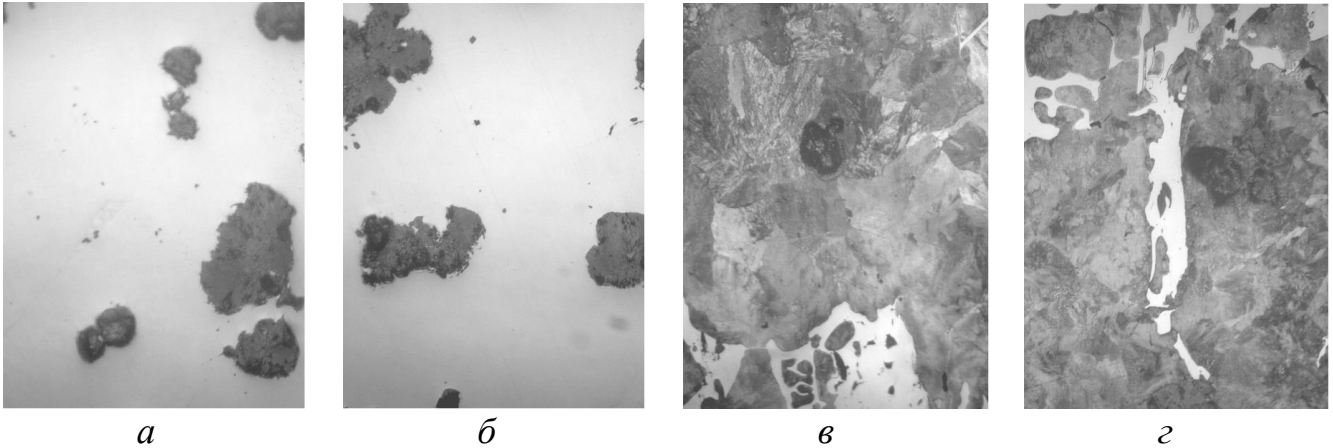


Рис. 2. Мікроструктура робочої зони валкового чавуну виконання СШХН-50 на відстані 40 мм від поверхні: включення кулястого графіту (а, б),  $\times 400$ ; перлітна матриця, колонія ледебуриту та кулястий графіт (в, з),  $\times 300$

У третьому розділі розглянуті передумови дослідження, постановка задачі, а також визначена робоча область досліджуваних параметрів і критеріїв якості прокатних валків із застосуванням пасивного експерименту. Ці дослідження виконували для встановлення закономірностей впливу різних технологічних параметрів.

Для періодичного технологічного процесу, з урахуванням можливих тимчасових змін якості вихідного матеріалу, до початку реалізації його основного технологічного циклу, потрібно розробити метод прогнозування значень показників якості цільового продукту.

На основі аналізу технології виробництва валків визначені значення змінних та критеріїв якості (рис. 3).

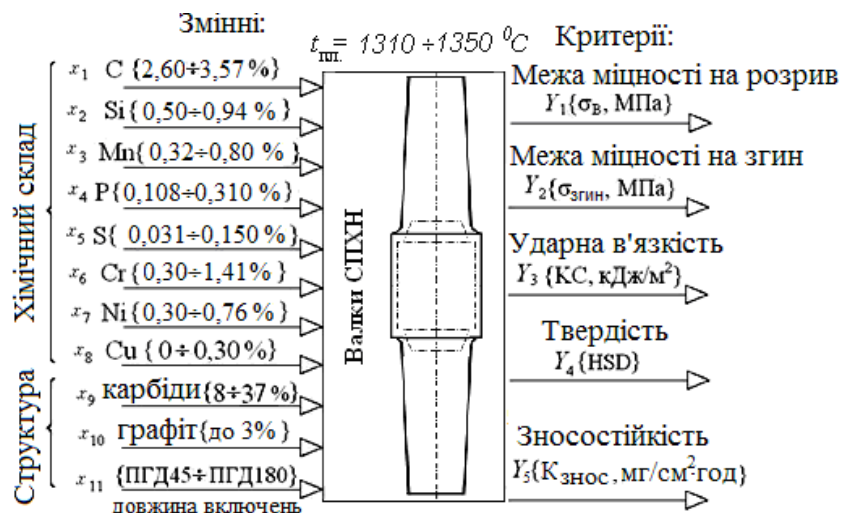


Рис. 3. Принципова схема багатопараметричної технології виробництва валків

Фактори  $X_9 \dots X_{11}$  – оцінюються і вносяться в паспорт на валки.

Із застосуванням експертних оцінок в якості критеріїв сортопрокатних валків обрані наступні механічні властивості: межа міцності на розрив ( $Y_1$ ), межа міцності на згин ( $Y_2$ ), ударна в'язкість ( $Y_3$ ), твердість ( $Y_4$ ) і одна з основних експлуатаційних характеристик – зносостійкість ( $Y_5$ ). Кількісні показники по хімічному складу обмежені технічними умовами (ТУ) У27.1-26524137-1291, а кількісні показники елементів структури визначали відповідно до Держстандарту 3443.

Запропонована наступна схема проведення даної роботи, що складається з 4 основних етапів (рис. 4). На *першому етапі* досліджувалася робоча область параметрів технології та критеріїв якості (пасивний експеримент, блоки 1-5) (рис. 4). У результаті реалізації першого етапу формуються рівняння у вигляді бази даних (блок 6) для досліджуваних валків, що описують якість цільового продукту як функцію хімічного складу вихідної сировини і параметрів структури. Рівняння, отримані на підставі реалізації пасивного експерименту й сформовані з урахуванням чисельних значень, що характеризують хімічний склад вихідного продукту, дозволяють прогнозувати показники механічних властивостей. Визначаючи робочу область, користувач, тим самим, визначає припустимі значення змінних, діапазон їхніх змін і критерії якості цільового продукту.

Після проведення пасивного експерименту реалізується *другий етап* досліджень. Його проведення ініційоване пошуком шляхів підвищення якості валків. Проаналізувавши технологію виробництва валків за останні 70 років, була висунута гіпотеза про те, що в робочій області параметрів технології є такі зони робочої області, у яких механічні властивості формуються як стабільні. Виходячи із припущення про те, що в робочій області існують невідомі раніше співвідношення параметрів, які поліпшують механічні властивості валків, була розроблена модифікація активного експерименту, що дозволяє одержати результат на реальному об'єкті в промислових умовах. При цьому, матриця планування активного експерименту, що представляє своєрідну базу даних, яка реалізує задану обмежену область функції мети, розбивається на три частини. *Перша частина*, це рядки матриці планування, у яких допускається проведення прямих експериментів на реальному об'єкті. *Друга частина* матриці планування – це ті рядки, по яким прямі експерименти проводити неможливо в силу обмежень на ресурси і технічні можливості. Реалізація цієї частини матриці базувалася на даних, одержаних шляхом застосування експертної оцінки фахівців виробництва (осіб, які приймають рішення – ОПР).

При реалізації другого етапу може виникнути необхідність коригування прогнозованих результатів. У цьому випадку експерти можуть провести повторні дослідження, на що вказують зв'язки між блоками 7, 8 та 9 (рис. 4). *Третя частина* матриці планування включає рядки, у яких експерти не в змозі зробити достовірну оцінку ситуації, що продиктована цими рядками. У цьому випадку використовується прогноз, заснований на аналізі існуючих теоретичних передумов, наведених у відповідній літературі. Реалізація активного експерименту дозволила одержати рівняння, що роблять можливим прогнозування механічних властивостей валків. Далі, на підставі аналізу механічних властивостей та експлуатаційних параметрів проводилась оцінка зносостійкості валків.

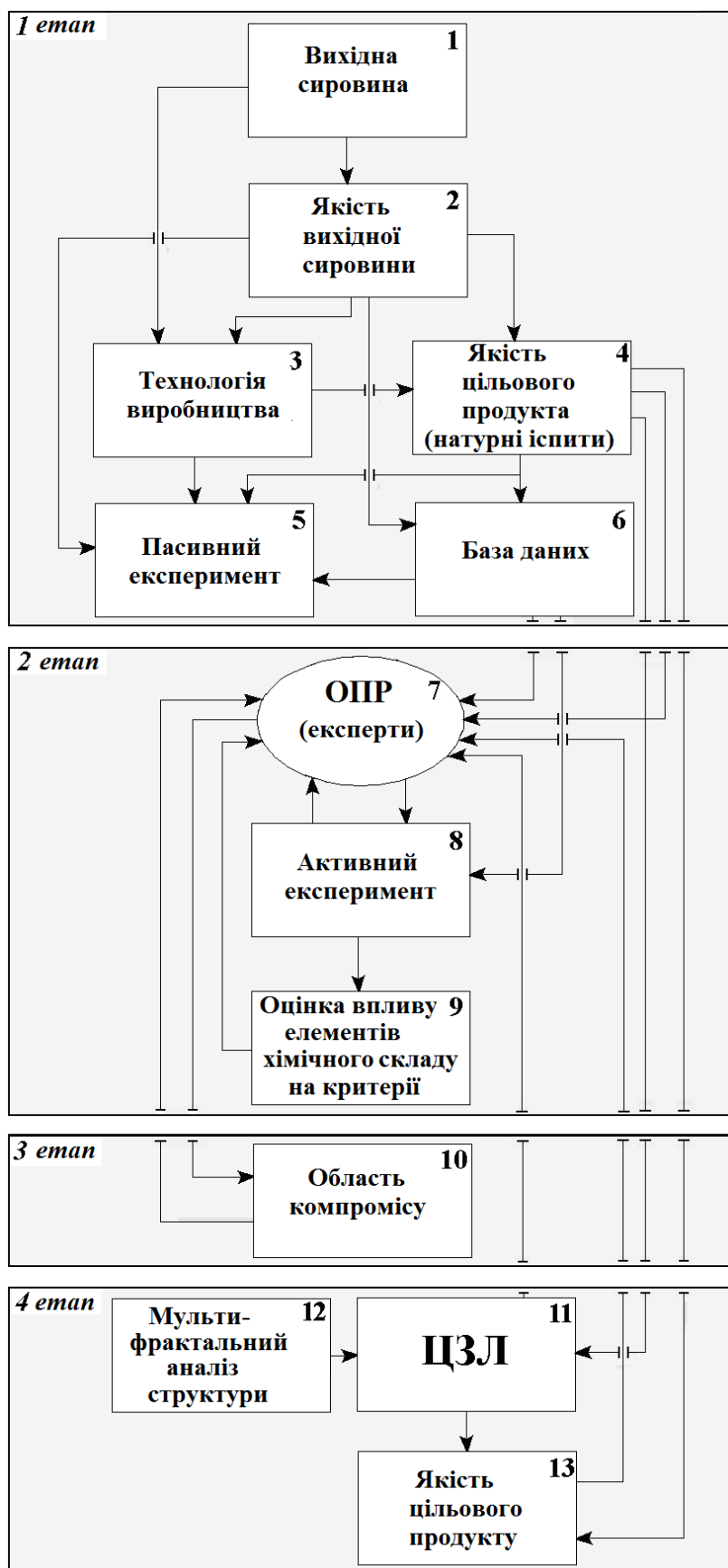


Рис. 4. Схема реалізації запропонованого методу

На *третьому етапі* визначалася область компромісу механічних властивостей прокатних валків (блок 10, рис. 4). Це обумовлено тим, що обрані

критерії якості можуть суперечити один одному, тобто поліпшуючи один критерій, може істотно знизиться – інший, наприклад, при збільшенні твердості знижується пластичність, при збільшенні в'язкості знижується крихкість та ін. Було поставлене завдання вибору такої області, у якій критерії мінімально суперечать один одному (область компромісу критеріїв якості валків).

*Четвертий етап* присвячений визначенню потенційної можливості, застосування теорії мультифракталів для прогнозу механічних властивостей валкового чавуну (блоки 11-13, рис. 4). Роботи В.С. Іванової, Б. Мандельброта, Ф. Енса та ін. підтверджують кореляцію між фрактальною структурою матеріалу і його властивостями. Реалізація даного етапу, з урахуванням установлення співвідношень між статистичними розмірностями елементів структури валкового чавуну і його механічними властивостями, дозволяє їх визначати по спеціально розробленій програмі в процесі проведення металографічного аналізу.

**В четвертому розділі** описаний розроблюваний метод оперативної оцінки механічних властивостей чавунних прокатних валків. При цьому, визначали робочу область досліджуваних параметрів і механічних властивостей валків виконання СПХН і СШХН. Отримані рівняння представляють базу даних. Для валків виконання СПХН робоча область механічних властивостей описується рівняннями (1-8), де  $x_1 - 2,60...3,57\% \text{ C}$ ;  $x_2 - 0,50...0,94\% \text{ Si}$ ,  $x_3 - 0,32...0,80\% \text{ Mn}$ ,  $x_4 - 0,108...0,310\% \text{ P}$ ,  $x_5 - 0,031...0,150\% \text{ S}$ ,  $x_6 - 0,30...1,41\% \text{ Cr}$ ,  $x_7 - 0,30...0,76\% \text{ Ni}$ ,  $x_8 - 0...0,30\% \text{ Cu}$ ,  $x_9 - \text{вміст карбідів } 8...37\%$ ,  $x_{10} - \text{вміст графіту} - \text{до } 3\%$ ,  $x_{11} - \text{довжина пластинчатого графіту ПГд45...ПГд180}$ , де  $r$  – коефіцієнт кореляції. Рівняння (1-4) та (9-12) дають можливість прогнозувати ці властивості валків в процесі їх виготовлення, шляхом коригування хімічного складу, а по рівнянням (5-8) та (13-16) можна визначати властивості готового цільового продукту з більшою вірогідністю завдяки вкладу характеристик структури.

$$Y_1 = 1362,7 - 392,9 \cdot x_1 + 265,3 \cdot x_2 - 761,1 \cdot x_3 + 690,6 \cdot x_4 - 1855,1 \cdot x_5 + 1035,5 \cdot x_6 - 272,4 \cdot x_7; \quad r=0,82 \quad (1)$$

$$Y_2 = 2581,8 - 441,5 \cdot x_1 - 301,7 \cdot x_2 - 1111,6 \cdot x_3 + 1444,4 \cdot x_4 - 6673,2 \cdot x_5 + 307,9 \cdot x_6 + 94,7 \cdot x_7; \quad r=0,96 \quad (2)$$

$$Y_3 = 55,5 + 1,8 \cdot x_1 - 28,9 \cdot x_2 + 45,5 \cdot x_3 - 36,2 \cdot x_4 + 6,9 \cdot x_5 - 95,5 \cdot x_6 + 25,4 \cdot x_7; \quad r=0,89 \quad (3)$$

$$Y_4 = 53,7 + 3,4 \cdot x_1 - 4,6 \cdot x_2 - 56,0 \cdot x_3 + 4,5 \cdot x_4 - 65,6 \cdot x_5 + 35,2 \cdot x_6 - 4,0 \cdot x_7; \quad r=0,82 \quad (4)$$

$$Y_1 = 6,7 + 1299,1 \cdot x_1 + 3532,3 \cdot x_2 + 10149,3 \cdot x_3 - 51508,1 \cdot x_4 + 42121,6 \cdot x_5 - 51,2 \cdot x_6 - 81,1 \cdot x_7 - 31427,7 \cdot x_8 + 2,3 \cdot x_9 - 19,2 \cdot x_{10} + 0,01 \cdot x_{11}; \quad r=0,93 \quad (5)$$

$$Y_2 = 5,1 + 2764,5 \cdot x_1 + 6310,3 \cdot x_2 + 20364,9 \cdot x_3 - 101743,1 \cdot x_4 + 80833,9 \cdot x_5 - 1519,2 \cdot x_6 + 376,3 \cdot x_7 - 62138,4 \cdot x_8 + 7,7 \cdot x_9 - 3,0 \cdot x_{10} - 0,1 \cdot x_{11}; \quad r=0,95 \quad (6)$$

$$Y_3 = -0,19 + 26,6 \cdot x_1 + 70,7 \cdot x_2 + 201,8 \cdot x_3 - 982,0 \cdot x_4 + 802,9 \cdot x_5 - 1,1 \cdot x_6 + 8,5 \cdot x_7 - 622,9 \cdot x_8 - 0,3 \cdot x_9 + 1,5 \cdot x_{10} + 0,02 \cdot x_{11}; \quad r=0,97 \quad (7)$$

$$Y_4 = -1,3 + 112,5 \cdot x_1 + 190,7 \cdot x_2 + 652,5 \cdot x_3 - 3415,9 \cdot x_4 + 2552,4 \cdot x_5 - 8,3 \cdot x_6 + 15,5 \cdot x_7 - 2113,2 \cdot x_8 - 0,5 \cdot x_9 - 12,3 \cdot x_{10} + 0,1 \cdot x_{11}. \quad r=0,88 \quad (8)$$

Робоча область механічних властивостей валків виконання СШХН описується наступними рівняннями (9-16):

$$Y_1 = 12,7 - 42,0 \cdot x_1 + 59,0 \cdot x_2 - 31,8 \cdot x_3 + 197,9 \cdot x_4 - 10634,4 \cdot x_5 - 104,4 \cdot x_6 - 9,5 \cdot x_7 + 11984,6 \cdot x_8; \quad r=0,98 \quad (9)$$

$$Y_2 = -371,2 + 72,1 \cdot x_1 + 41,1 \cdot x_2 - 117,7 \cdot x_3 + 156,2 \cdot x_4 - 9975,4 \cdot x_5 + 12,0 \cdot x_6 - 27,8 \cdot x_7 + 19495,6 \cdot x_8; \quad r=0,97 \quad (10)$$

$$Y_3 = -34,3 + 0,1 \cdot x_1 + 1,8 \cdot x_2 + 20,4 \cdot x_3 - 40,6 \cdot x_4 - 12,2 \cdot x_5 - 17,3 \cdot x_6 + 3,4 \cdot x_7 + 809,5 \cdot x_8; \quad r=0,98 \quad (11)$$

$$Y_4 = 127,1 - 11,8 \cdot x_1 - 0,2 \cdot x_2 - 9,1 \cdot x_3 + 4,6 \cdot x_4 + 29,8 \cdot x_5 + 14,2 \cdot x_6 - 0,1 \cdot x_7 - 859,9 \cdot x_8; \quad r=0,82 \quad (12)$$

$$Y_1 = 105,5 + 26,2 \cdot x_1 + 7,2 \cdot x_2 - 145,5 \cdot x_3 - 26,1 \cdot x_4 - 4882,9 \cdot x_5 - 20,3 \cdot x_6 + 27,5 \cdot x_7 + 5029,4 \cdot x_8 - 2,7 \cdot x_9 + 100,0 \cdot x_{10} + 0,4 \cdot x_{11}; \quad r=0,98 \quad (13)$$

$$Y_2 = -294,8 + 200,7 \cdot x_1 - 33,0 \cdot x_2 - 353,8 \cdot x_3 - 210,9674 \cdot x_4 - 5594,1712 \cdot x_5 + 120,0 \cdot x_6 + 30,2 \cdot x_7 + 10357,4 \cdot x_8 - 5,3 \cdot x_9 + 130,5 \cdot x_{10} + 1,1 \cdot x_{11}; \quad r=0,95 \quad (14)$$

$$Y_3 = -28,5 + 3,8 \cdot x_1 - 0,9 \cdot x_2 + 16,2 \cdot x_3 + 30,0 \cdot x_4 + 296,5 \cdot x_5 - 14,0 \cdot x_6 + 5,4 \cdot x_7 + 456,4 \cdot x_8 - 0,2 \cdot x_9 + 3,9 \cdot x_{10} + 0,01 \cdot x_{11}; \quad r=0,97 \quad (15)$$

$$Y_4 = 128,4 - 12,8 \cdot x_1 + 1,5 \cdot x_2 - 5,3 \cdot x_3 + 10,7 \cdot x_4 - 374,0 \cdot x_5 + 7,7 \cdot x_6 - 0,4 \cdot x_7 - 516,9 \cdot x_8 - 0,2 \cdot x_9 - 9,4 \cdot x_{10} - 0,01 \cdot x_{11}. \quad r=0,73 \quad (16)$$

де  $x_1 - 3,00 \dots 3,80\%$  C;  $x_2 - 0,17 \dots 2,43\%$  Si;  $x_3 - 0,30 \dots 0,91\%$  Mn;  $x_4 - 0,052 \dots 0,380\%$  P;  $x_5 - 0,004 \dots 0,012\%$  S;  $x_6 - 0,16 \dots 0,82\%$  Cr;  $x_7 - 0,17 \dots 2,40\%$  Ni;  $x_8 - 0,030 \dots 0,058\%$  Mg;  $x_9 - 6 \dots 41\%$  карбідів;  $x_{10} - 0,5 \div 3\%$  кулястого графіту;  $x_{11} -$  діаметр кулястого графіту оцінювався балами від 45 до 180 ШГд, де  $r$  – коефіцієнт кореляції.

Математична модель адекватна за критерієм Фішера  $F=1,369$  при рівні значимості  $\alpha=0,05$  – для валків виконання СПХН (вибірка по 320 плавкам чавуну на підприємстві ДЗПВ загальною масою  $\sim 930$  тонн);  $F=1,247$  при рівні значимості  $\alpha=0,05$  – для валків виконання СШХН (вибірка по 283 плавкам масою  $\sim 800$  тонн). Аналіз рівнянь (1-16) підтверджує той факт, що найбільш сильний зв'язок спостерігається між функцією мети (показниками міцності  $Y_1, Y_2$  і твердістю  $Y_4$ ) та аргументами  $x_1$  (вуглець),  $x_6$  (хром),  $x_7$  (нікель) – для валків виконання СПХН. Це підтверджується високими коефіцієнтами кореляції, що обґрунтовується фізико-хімічною інтерпретацією їх впливу. Для валків виконання СШХН істотно впливають на механічні властивості магній ( $x_8$ ), вміст графіту ( $x_{10}$ ), про що свідчать коефіцієнти при змінних.

Задачу одержання валків зі стабільними механічними характеристиками вирішували з використанням експертної оцінки. На підставі аналізу робочої області параметрів технології була висунута гіпотеза, що в ній є такі ділянки (зони), у яких механічні властивості помітно підвищуються. З огляду на досить велику кількість можливих варіантів взаємодії обраних змінних –  $2^{11}$ , які неможливо реалізувати з позицій технічного й економічного підходів, був здійснений модифікований варіант активного експерименту, що полягає в тому, що матриця планування була реалізована у вигляді дробної репліки  $2^4=16$  рядків і розбита на три основні області (табл. 2 та 3):

1. Область, в якій проведені прямі експерименти. Для валків виконання СПХН – це рядки матриці 6, 9, 12 (табл. 2); валків виконання СШХН – рядки матриці 13-16 (табл. 3).
2. Область, у якій результати прямих експериментів заміняли експертними оцінками. Для валків виконання СПХН – це рядки матриці 2, 4, 7, 8, 10, 11, 14, 16 (табл. 2); валків виконання СШХН – рядки матриці 5, 6, 8, 10 (табл. 3).
3. Область, у якій значення механічних властивостей заміняли на підставі аналізу статистичних даних, задана рядками матриці 1, 3, 5, 13, 15 – для валків виконання СПХН (табл. 2); рядками 1–4, 7, 9, 11, 12 – для валків виконання СШХН (табл. 3).

В матрицях планування активного експерименту загальний рівень (ЗР), інтервал варіювання (ІВ), нижній рівень (НР) та верхній рівень (ВР) чисельних значень змінних (елементів хімічного складу і параметрів структури) вибирались згідно експертній оцінці.

При обробці матриць отримані рівняння прогнозу механічних властивостей валків виконань СПХН (17-20) і СШХН (21-24).

$$Y_1 = 430,1 + 164,6 \cdot x_1 - 89,2 \cdot x_2 - 48,7 \cdot x_3 - 221,6 \cdot x_4 - 322,7 \cdot x_5 + 47,1 \cdot x_6 + 37,5 \cdot x_7 - 1,6 \cdot x_8 + 1,7 \cdot x_9 - 1,5 \cdot x_{10}; \quad r=0,94 \quad (17)$$

$$Y_2 = 989,2 + 312,2 \cdot x_1 - 202,0 \cdot x_2 - 1288,6 \cdot x_3 - 697,5 \cdot x_4 + 110,1 \cdot x_5 + 192,7 \cdot x_6 - 23,0 \cdot x_7 - 7,5 \cdot x_8 - 20,8 \cdot x_9 - 2,7 \cdot x_{10}; \quad r=0,93 \quad (18)$$

$$Y_3 = -1,3 + 4,3 \cdot x_1 + 3,0 \cdot x_2 + 6,8 \cdot x_3 + 7,1 \cdot x_4 - 34,9 \cdot x_5 - 8,7 \cdot x_6 + 3,7 \cdot x_7 + 2,0 \cdot 10^{15} \cdot x_8 + 3,0 \cdot x_9 + 0,03 \cdot x_{10}; \quad r=0,74 \quad (19)$$

$$Y_4 = 48,8 + 5,2 \cdot x_1 - 6,0 \cdot x_2 - 14,9 \cdot x_3 - 11,1 \cdot x_4 + 6,5 \cdot x_5 + 6,2 \cdot x_6 + 2,2 \cdot x_7 + 0,1 \cdot x_8 - 3,8 \cdot x_9 - 0,1 \cdot x_{10}, \quad r=0,80 \quad (20)$$

де  $x_1 \dots x_7$  – вміст С, Si, Mn, P, S, Cr, Ni в % по масі відповідно;  $x_8, x_9$  – площа карбідів і графіту в %;  $x_{10}$  – бал графіту, ПГд. Похибка рівнянь (17-20) складала: 5,6%, 7,3%, 7,8% і 6,4% відповідно.

$$Y_1 = -553,6 + 544,6 \cdot x_1 - 184,7 \cdot x_2 + 2766,0 \cdot x_3 - 1032,6 \cdot x_4 + 3469,3 \cdot x_5 - 737,3 \cdot x_6 - 1500,0 \cdot x_7 + 571,4 \cdot x_8 - 5,4 \cdot x_9 + 123,5 \cdot x_{10} - 0,01 \cdot x_{11}; \quad r=0,95 \quad (21)$$

$$Y_2 = -1771,6 + 1392,6 \cdot x_1 - 682,1 \cdot x_2 + 7246,1 \cdot x_3 - 2016,4 \cdot x_4 + 13201,0 \cdot x_5 - 2153,2 \cdot x_6 - 3766,4 \cdot x_7 + 5920,7 \cdot x_8 - 8,0 \cdot x_9 + 161,9 \cdot x_{10} + 0,6 \cdot x_{11}; \quad r=0,90 \quad (22)$$

$$Y_3 = 30,7 + 18,4 \cdot x_1 + 1,9 \cdot x_2 + 116,1 \cdot x_3 - 21,7 \cdot x_4 + 171,3 \cdot x_5 - 28,0 \cdot x_6 - 92,4 \cdot x_7 - 62,3 \cdot x_8 - 0,9 \cdot x_9 - 6,0 \cdot x_{10} - 0,1 \cdot x_{11}; \quad r=0,77 \quad (23)$$

$$Y_4 = 46,3 - 36,0 \cdot x_1 + 10,3 \cdot x_2 - 220,6 \cdot x_3 + 37,8 \cdot x_4 + 63,0 \cdot x_5 + 66,0 \cdot x_6 + 161,1 \cdot x_7 - 146,5 \cdot x_8 + 1,0 \cdot x_9 + 10,4 \cdot x_{10} + 0,1 \cdot x_{11}, \quad r=0,85 \quad (24)$$

де  $x_1 \dots x_8$  – вміст С, Si, Mn, P, S, Cr, Ni, Mg в % по масі відповідно;  $x_9, x_{10}$  – площа карбідів і графіту в %;  $x_{11}$  – бал кулястого графіту, ШГд. Відносна похибка рівнянь регресії (21-24) складала: 5,2%, 7,1%, 8,6% та 4,3% відповідно.

Математична модель (17-24) адекватна за критерієм Фішера:  $F=1,206$  при рівні значимості  $\alpha=0,05$  – для валків виконання СПХН та  $F=1,315$  при  $\alpha=0,05$  – для валків виконання СШХН.

Таблиця 2

Зона робочої області, що містить стабільні значення механічних властивостей валків виконання СПХН

ЗР	3,08		1,075		0,57		0,239		0,08		0,75		0,93		21,5		1,25		112,5		Твердість по Шору		
	ІВ	0,24	0,565	0,19	0,131	0,05	0,36	0,46	13,5	0,75	67,5	НР	2,84	0,51	0,38	0,108	0,03	0,39	0,47	8		0,5	45
ВР	3,32	1,64	0,76	0,37	0,13	1,11	1,39	35	2	180	Кар-Гра-бідифіт		Бал-Гра-графіта		σ <sub>згин</sub>		σ <sub>в</sub>		Межа міцності на згин		Ударна в'язкість при 20 <sup>0</sup> С		
Позна-чення	С	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	%		%		%		%		МПа		МПа		кДж/м <sup>2</sup>		HSD	
Розмір-ність	%	%	%	%	%	%	%	%		%		%		%		МПа		МПа		кДж/м <sup>2</sup>		в умовних одиницях	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Код	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>								
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	270	405	24	39	39	39	39
2	+	+	+	-	+	+	-	-	+	-	+	340	520	23	40	40	340	520	23	40	40	40	40
3	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	-	380	612	19	49	49	380	612	19	49	49	49	49
4	+	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	350	525	20	45	45	350	525	20	45	45	45	45
5	+	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	240	365	28	36	36	240	365	28	36	36	36	36
6	+	-	+	-	+	+	-	-	-	+	-	320	450	21	49	49	320	450	21	49	49	49	49
7	+	-	-	+	+	-	+	+	+	-	+	330	487	19	49	49	330	487	19	49	49	49	49
8	+	-	-	-	-	-	14	14	+	+	+	325	485	20	46	46	325	485	20	46	46	46	46
9	-	+	+	+	+	-	-	-	+	+	-	330	480	21	46	46	330	480	21	46	46	46	46
10	-	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	380	540	20	49	49	380	540	20	49	49	49	49
11	-	+	+	-	+	-	-	-	-	+	+	370	624	23	39	39	370	624	23	39	39	39	39
12	-	+	+	-	-	+	+	+	-	-	+	410	650	21	47	47	410	650	21	47	47	47	47
13	-	-	+	+	+	-	-	-	-	-	+	370	603	22	44	44	370	603	22	44	44	44	44
14	-	-	+	+	+	-	+	+	-	+	+	400	624	20	43	43	400	624	20	43	43	43	43
15	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-	-	480	746	17	54	54	480	746	17	54	54	54	54
16	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	520	890	16	55	55	520	890	16	55	55	55	55



Таблиця 3

Зона робочої області, що містить стабільні значення механічних властивостей валків виконання СШХН

ЗР	3,265	1,785	0,525	0,196	0,008	0,575	0,925	0,044	22	1	112,5	Межа міцності на розрив	Межа міцності на згин	Ударна в'язкість при 20°C	Твердість по Шору	
	0,265	0,365	0,075	0,144	0,004	0,185	0,205	0,014	16	1	67,5					
НР	3	1,42	0,45	0,052	0,004	0,39	0,72	0,03	6	0,5	45					
ВР	3,53	2,15	0,6	0,34	0,012	0,76	1,13	0,058	38	2	180					
Позначення	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mg	Кар-бідифіт	Гра-фіт	Бал гра-фіта	σ <sub>B</sub>	σ <sub>ЗГН</sub>	KC	HSD	
Розмірність	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	ШГД	МПа	МПа	кДж/м <sup>2</sup>	в умовних одиницях	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
Код	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>4</sub>	X <sub>5</sub>	X <sub>6</sub>	X <sub>7</sub>	X <sub>8</sub>	X <sub>9</sub>	X <sub>10</sub>	X <sub>11</sub>	Y <sub>1</sub>	Y <sub>2</sub>	Y <sub>3</sub>	Y <sub>4</sub>
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	223	420	9	68,5
2	+	+	+	-	+	+	-	+	+	-	+	-	380	750	17	54,5
3	+	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	304	588	12	65
4	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	+	415	786	16	56
5	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	-	-	540	903	32	39
6	+	-	+	-	-	+	-	-	-	+	-	+	600	1030	27	44
7	+	-	-	+	-	-	+	+	-	-	+	+	360	720	14	60
8	+	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	-	500	880	22	49
9	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	440	803	21,5	49
10	+	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	333	665	18	53
11	+	+	-	+	-	+	-	-	-	+	+	+	177	350	9	72
12	+	+	-	-	-	+	+	-	-	-	+	-	550	935	30	41
13	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	430	800	19	51
14	+	-	+	-	+	-	+	-	-	+	+	-	580	953	26	44
15	+	-	-	+	+	+	-	+	+	-	-	-	380	700	17	54
16	+	-	-	-	+	+	+	+	+	+	-	+	320	600	15	56

За планом, адаптованим під дані цього експерименту та з використанням методу руху по градієнту, у заводських умовах розроблені та рекомендовані у виробництво на підприємстві ПАТ ДЗПВ склади досліджуваних сортопрокатних валків, що забезпечують стабільні механічні властивості робочої зони металевих бочок (табл. 4 і табл. 5).

Таблиця 4

Розробка хімічного складу валків виконання СПХН (41...49) з урахуванням вмісту та фрактальної розмірності параметрів структури робочої зони бочок

Хімічний склад валків, згідно ТУ В27.1-26524137-1291 і параметри структури		Рекомендований склад валків, що забезпечує стабільні механічні властивості	
C, %	2,70...3,90	C, %	2,95...3,30
Si, %	0,30...1,60	Si, %	0,91...1,50
Mn, %	0,30...0,80	Mn, %	0,54...0,75
P, %	≤ 0,300...0,500	P, %	0,080...0,200
S, %	≤ 0,100...0,160	S, %	0,004...0,031
Cr, %	0,20...1,20	Cr, %	0,56...1,20
Ni, %	0,70...2,50	Ni, %	0,80...1,40
Карбіди, %	не регламентовані	Карбіди, %	12...30
Графіт, %	не регламентовані	Графіт, %	0,5...2
		Фрактальна розмірність карбідів	1,62...1,89
		Фрактальна розмірність графіту	1,58...1,97

Таблиця 5

Розробка хімічного складу валків виконання СШХН (41...50) з урахуванням вмісту та фрактальної розмірності параметрів структури робочої зони бочок

Хімічний склад валків, згідно ТУ В27.1-26524137-1291 і параметри структури		Рекомендований склад валків, що забезпечує стабільні механічні властивості	
C, %	2,70...3,90	C, %	3,00...3,40
Si, %	1,00...2,60	Si, %	1,45...1,80
Mn, %	0,40...1,00	Mn, %	0,45...0,65
P, %	≤ 0,300	P, %	0,040...0,200
S, %	≤ 0,020	S, %	0,004...0,010
Cr, %	0,20...1,00	Cr, %	0,60...0,90
Ni, %	0,80...1,60	Ni, %	0,70...1,30
Mg, %	відповідно до технології	Mg, %	0,035...0,056
Карбіди, %	не регламентовані	Карбіди, %	9...25
Графіт, %	не регламентовані	Графіт, %	0,5...2,5
		Фрактальна розмірність карбідів	1,66...1,94
		Фрактальна розмірність графіту	1,50...2

Рекомендовано внести дані зміни в діючі галузеві ТУ по хімічному складу валків виконань СШХН та СПХН.

В табл. 6 і табл. 7 наведена апробація розроблених складів валків в умовах підприємства ПАТ ДЗПВ.

Таблиця 6

Механічні властивості і склад валків виконання СПХН (41...60), отримані в результаті проведення прямого експерименту та прогнозу

Хімічний склад (Прогнозований хімічний склад)							Механічні властивості (Прогнозовані механічні властивості)			
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	$\sigma_B$ , Мпа	$\sigma_{згин}$ , Мпа	КС, кДж/м <sup>2</sup>	HSD
3,57 (3,55)	0,89 (0,90)	0,34 (0,35)	0,236 (0,23)	0,031 (0,032)	0,567 (0,560)	1,043 (1,044)	365 (350)	790 (770)	13 (11)	70 (72)
3,10 (3,12)	0,70 (0,69)	0,76 (0,77)	0,17 (0,17)	0,045 (0,44)	0,76 (0,75)	0,99 (1,00)	320 (340)	450 (440)	21 (20)	49 (52)
3,03 (3,03)	0,85 (0,86)	0,73 (0,72)	0,115 (0,120)	0,035 (0,033)	0,76 (0,75)	1,17 (1,17)	350 (340)	480 (500)	21 (20)	46 (46)
2,95 (2,96)	0,75 (0,75)	0,62 (0,62)	0,108 (0,110)	0,035 (0,035)	0,730 (0,740)	1,12 (1,12)	390 (410)	804 (820)	22 (21)	46 (45)

Таблиця 7

Механічні властивості і склад валків виконання СШХН (41...50), отримані в результаті проведення прямого експерименту та прогнозу

Хімічний склад (Прогнозований хімічний склад)								Механічні властивості (Прогнозовані механічні властивості)			
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mg	$\sigma_B$ , Мпа	$\sigma_{згин}$ , Мпа	КС, кДж/м <sup>2</sup>	HSD
3,69 (3,68)	0,17 (0,18)	0,30 (0,32)	0,38 (0,36)	0,008 (0,009)	0,16 (0,16)	0,79 (0,80)	0,052 (0,051)	440 (420)	830 (800)	33 (32)	38 (39)
3,55 (3,56)	0,94 (0,93)	0,47 (0,45)	0,38 (0,39)	0,009 (0,009)	0,070 (0,073)	0,17 (0,19)	0,051 (0,050)	470 (450)	760 (800)	32 (30)	38 (40)
3,46 (3,46)	1,91 (1,94)	0,45 (0,44)	0,28 (0,30)	0,011 (0,012)	0,45 (0,45)	0,85 (0,86)	0,056 (0,056)	440 (425)	810 (820)	14 (14)	51 (49)
3,71 (3,72)	0,83 (0,84)	0,73 (0,75)	0,20 (0,20)	0,008 (0,008)	0,04 (0,06)	0,14 (0,15)	0,035 (0,036)	322 (345)	606 (562)	23 (24)	48 (48)

Середнє відхилення експериментальних значень по хімічному складу для валків виконання СШХН становить  $\pm 0,22\%$  по масі, а середнє відхилення прогнозованого складу  $\pm 0,24\%$  по масі. Для валків виконання СПХН середнє відхилення даних по хімічному складу склав  $\pm 0,11\%$  по масі, а середнє відхилення прогнозованого складу  $\pm 0,12\%$  по масі. При цьому середнє відхилення значень механічних властивостей валків виконання СШХН, визначених шляхом натурних випробувань, не перевищує  $4,6\%$ , а відхилення прогнозованих властивостей – не перевищує  $7,8\%$ .

Для валків виконання СПХН середнє відхилення по властивостям, визначеним шляхом натурних випробувань, не перевищує 5,1%, за прогнозом – 8,6%.

Проведена оцінка ступеня впливу хімічного складу на механічні властивості, що представлена у вигляді гістограм на рис. 5 та рис. 6. Стовпці гістограми, спрямовані вище нуля, описують позитивний вплив елементів хімічного складу на властивості, нижче нуля - негативний.

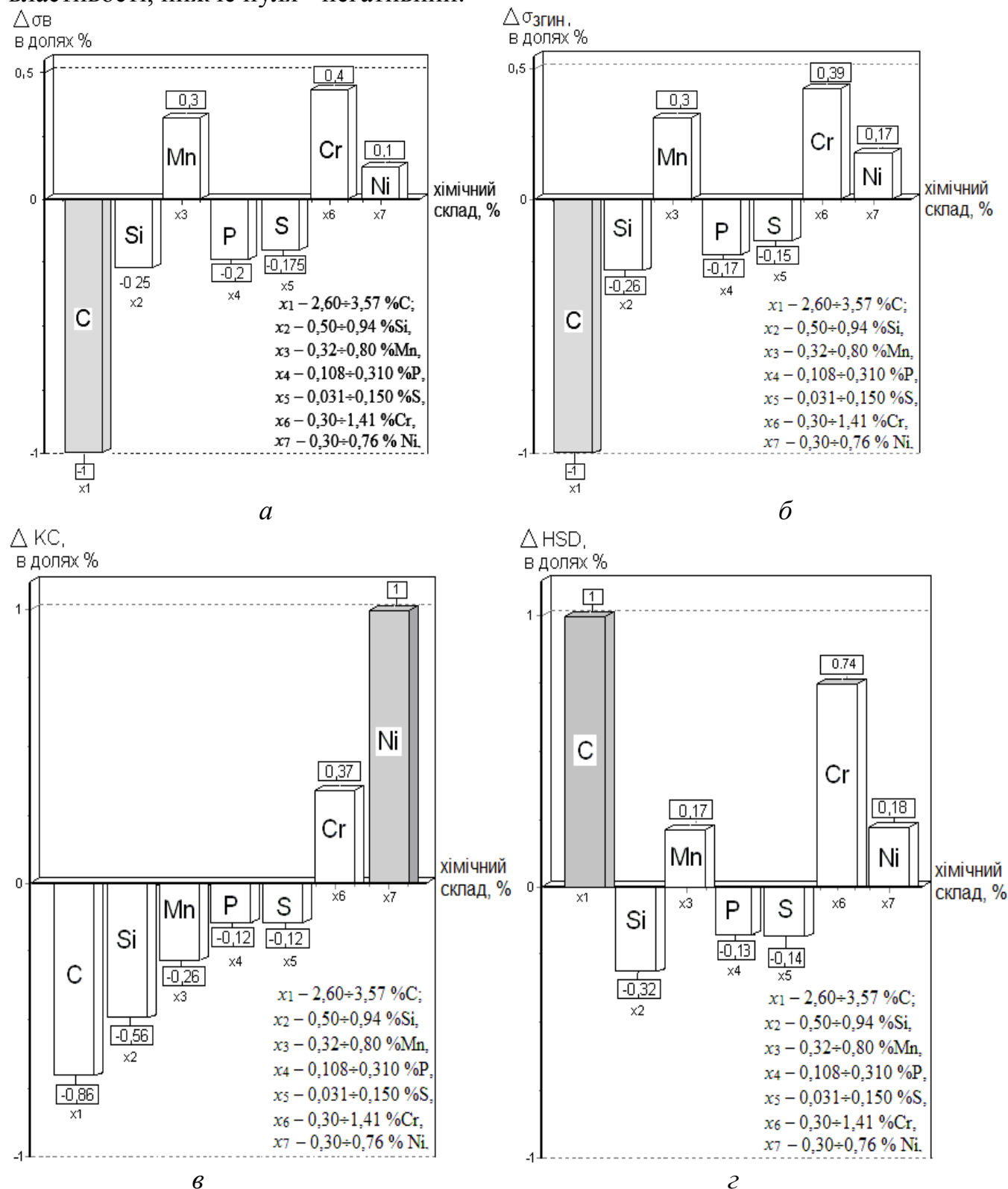


Рис. 5. Ступінь впливу елементів хімічного складу валків виконання СПХН на: межу міцності на розрив (а), межу міцності на згин (б), ударну в'язкість (в), твердість (г)

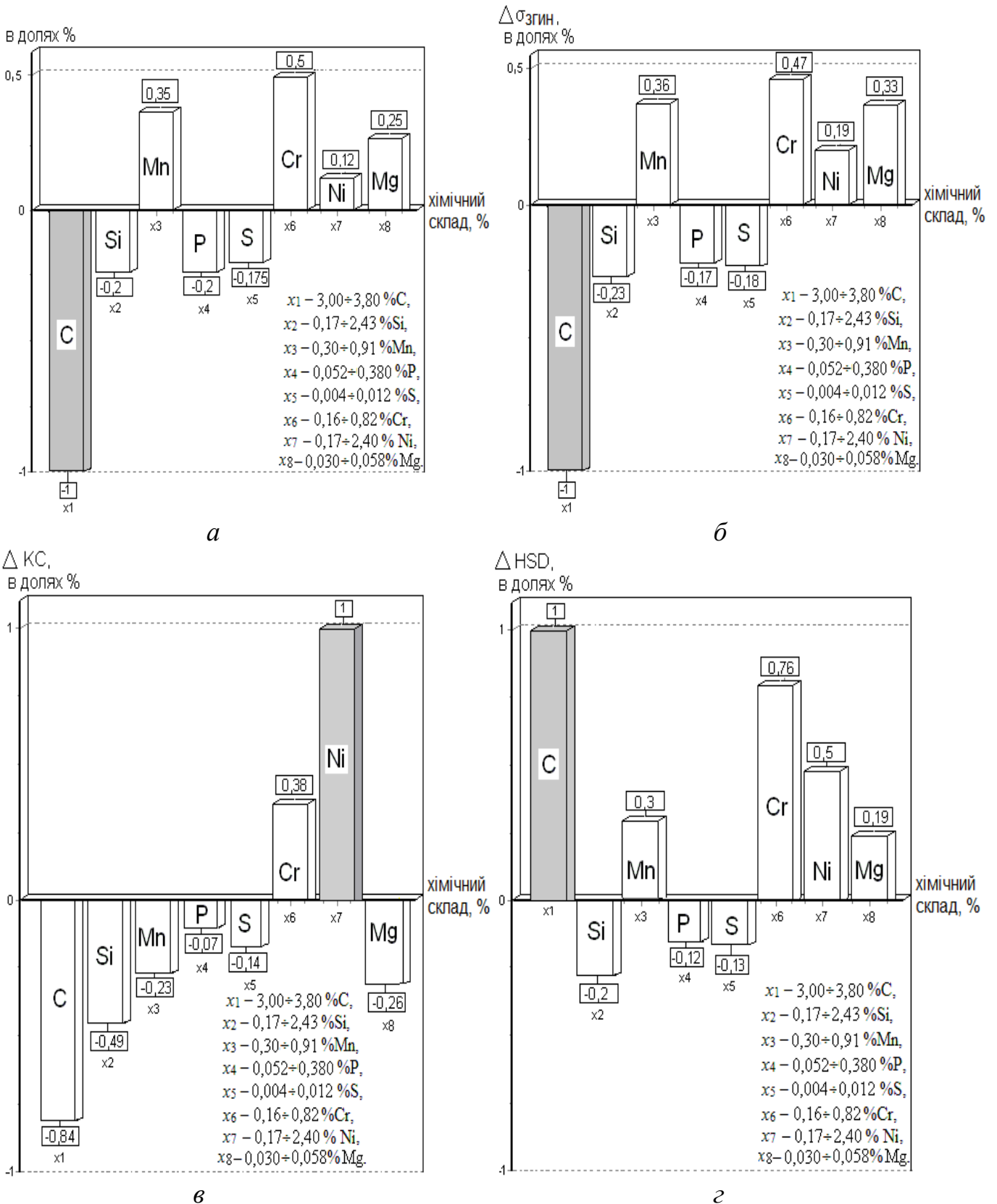
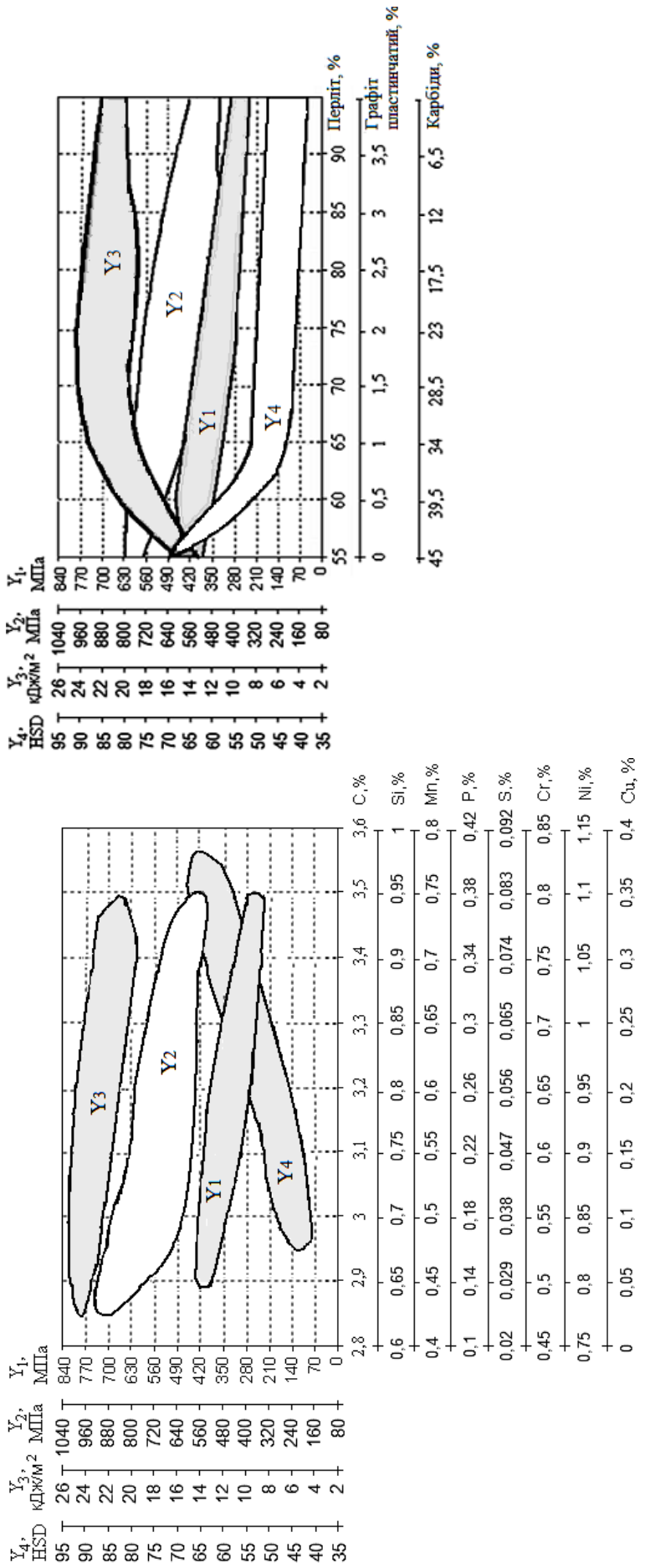


Рис. 6. Ступінь впливу елементів хімічного складу валків виконання СШХН на: межу міцності на розрив (а), межу міцності на згин (б), ударну в'язкість (в), твердість (г)

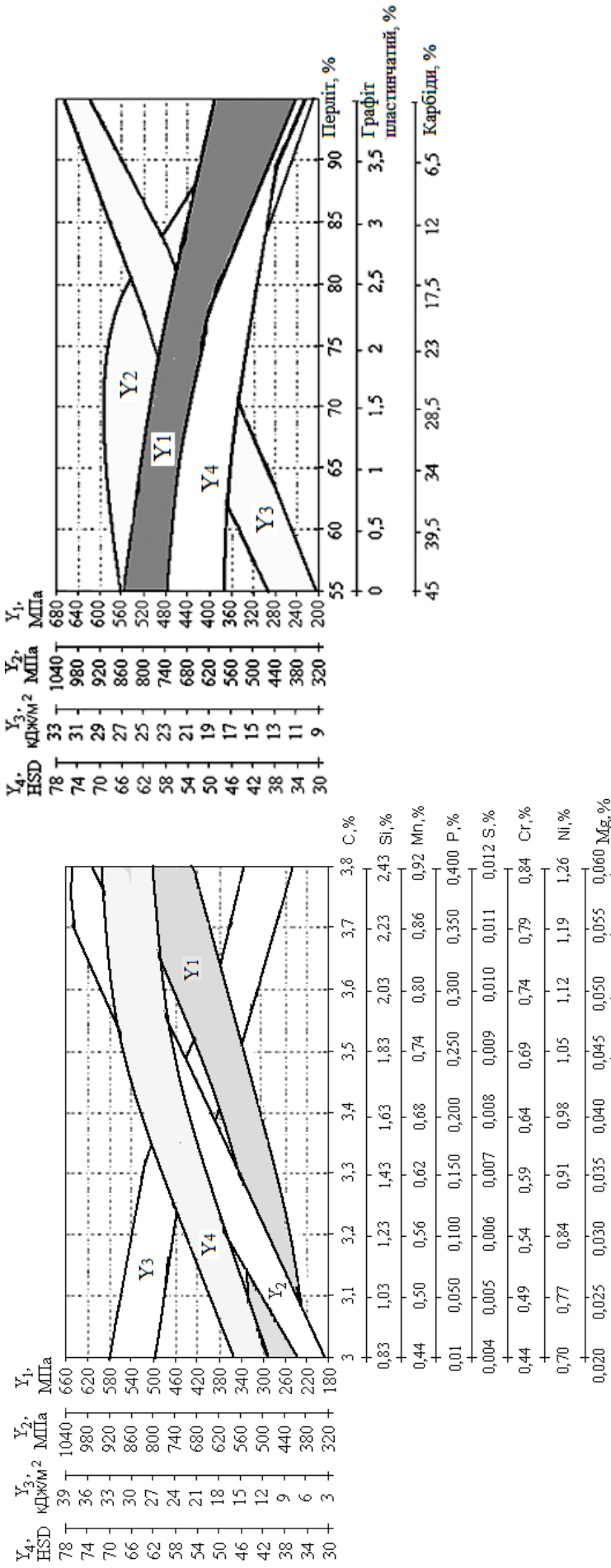
Область компромісу критеріїв якості робочої зони бочок валків виконання СПХН, СШХН визначена на основі даних пасивного експерименту (рис. 7 та рис. 8).



а

б

Рис. 7. Области компромісу механічних властивостей робочої зони бочок валків виконання СПХН в залежності від хімічного складу (а) та структури (б): Y<sub>1</sub>≈220÷380 МПа, Y<sub>2</sub>≈390÷840 МПа, Y<sub>3</sub>≈8÷25 кДж/м<sup>2</sup>, Y<sub>4</sub>≈40÷70 HSD з урахуванням всього діапазону застосовуваних умов охолодження в металевій формі



б

а

Рис. 8. Области компромісу механічних властивостей робочої зони бочок валків виконання СПХН в залежності від хімічного складу (а) та структури (б):  $Y_1 \approx 240 \div 460$  МПа,  $Y_2 \approx 330 \div 940$  МПа,  $Y_3 \approx 9 \div 33$  кДж/м<sup>2</sup>,  $Y_4 \approx 40 \div 60$  HSD з урахуванням всього діапазону застосовуваних умов охолодження в металевій формі

Валки зі стабільними показниками механічних властивостей, як показали багаточисельні дослідження, мають стабільні службові показники якості, зокрема зносостійкості. Для підвищення зносостійкості сортопрокатних чавунних валків були проведені дослідження, що ґрунтуються на аналізі технології їх експлуатації та статистичних даних (вибірка по ~ 500 валкам).

Встановлено вплив експлуатаційних факторів – шляху тертя (8...100 м), питомого тиску (0...350 МПа), швидкості ковзання (0...2,5 м/с) та твердості (36...65 HSD – для СПХН та 38...50 HSD – для СШХН) на зносостійкість  $K_{\text{знос}}$  ( $Y_5$ ) робочої зони бочок сортопрокатних чавунних валків (25, 26). Величину зносу визначали із розрахунку втрати маси бочки валка в мг на  $1 \text{ см}^2$  за 1 годину ( $\text{мг}/\text{см}^2 \cdot \text{год}$ ).

Реалізовано метод прогнозу зносостійкості валків виконання СПХН і СШХН. Для валків виконання СПХН зносостійкість визначається за допомогою наступного рівняння:

$$Y_5 = K_{\text{знос}} = 174,87 + 0,63 \cdot X_{12} + 0,25 \cdot X_{13} + 31,61 \cdot X_{14} - 3,62 \cdot X_{15}; \quad r=0,85 \quad (25)$$

для валків виконання СШХН:

$$Y_5 = K_{\text{знос}} = 273,41 + 0,91 \cdot X_{12} + 0,07 \cdot X_{13} + 3,19 \cdot X_{14} - 5,31 \cdot X_{15}, \quad r=0,83 \quad (26)$$

де  $X_{12}$  – шлях тертя, м;  $X_{13}$  – питомий тиск, МПа ;  $X_{14}$  – швидкість ковзання, м/с;  $X_{15}$  – твердість по Шору HSD.

Розрахункова похибка показників зносостійкості становить 6,5%.

Практична цінність отриманих математичних моделей підтверджується:

- оперативністю результатів оцінки зносостійкості валків завдяки програмній реалізації;
- вибором оптимальних параметрів експлуатації валків у кожному конкретному випадку, що повинне привести до скорочення втрати маси та збільшення тривалості часу експлуатації;
- вірогідністю отриманих результатів завдяки значному масиву статистичних даних по підприємству;
- можливістю оперативного коригування результатів при необхідності зміни режиму експлуатації валка або його заміни на валок іншого виконання;
- поповненням бази даних по зносостійкості, розрахованими у процесі експлуатації.

У **п'ятому розділі** встановлено зв'язок між структурою та механічними властивостями прокатних валків. Актуальність реалізації даного розділу обумовлена тим, що встановити однозначну відповідність між елементами структури металу і його властивостями є часто проблематичним завданням, бо елементи структури найчастіше мають складну геометричну конфігурацію форми. На основі аналізу кількісної і якісної оцінки реальних структур спостерігаються деякі недопустимі розходження між результатами прямих експериментів ідентифікації структури металу та методами їх прогнозування. Даний



факт свідчить про неповноту формальної аксіоматики, яка описує елементи структури металу за допомогою традиційних фігур геометрії Евкліда, що ініціює необхідність використання інших перспективних підходів до оцінки структури, зокрема мультифрактального формалізму.

У теорії мультифракталів відзначається, що найбільш прийнятною для оцінки елементів структури є апроксимація їх як фігурами Евкліда, так і фігурами з дробною розмірністю. Відповідно до запропонованої методики, заснованої на мультифрактальному формалізмі, кожен неоднорідний об'єкт, яким є структури більшості металів, може характеризуватися спектром статистичних розмірностей Реньї.

Показано, що розрахунок спектра статистичних розмірностей проводився для кожного елемента структури по спеціально розробленому й реалізованому на ЕОМ алгоритму. Відповідно до цього алгоритму розрахунок спектра статистичних розмірностей проводився по наступній формулі (27), що реалізує обчислення за методикою мультифрактального аналізу.

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta}, \quad (27)$$

де  $p_i$  – імовірність попадання точки, що перебуває на досліджуваному об'єкті, в  $i$ -у ячійку квадратної сітки з розміром  $\delta$ . Розмірності спектра мають наступний фізичний зміст:  $D_0$  – однорідний фрактал при  $q=0$  (розмірність Хаусдорфа-Безиковича);  $D_1$  – інформаційна розмірність при  $q=1$  (інформаційна ентропія), що характеризує швидкість росту кількості інформації, що показує, як зростає інформація, необхідна для визначення місцезнаходження точки, що перебуває на об'єкті дослідження, при зменшенні розміру ячійки  $\delta$  до нуля;  $D_2$  – кореляційна розмірність при  $q=2$ , що характеризує ймовірність знаходження в одній і тій же ячійці сітки двох точок, що перебувають на об'єкті спостереження;  $D_\infty$  – розмірність, що характеризує найбільш розріджений простір в об'єкті спостереження (світлі ділянки структури);  $D_{-\infty}$  – розмірність, що характеризує найбільш концентрований простір (темні ділянки структури). Як граничні значення для  $D_{-\infty}$  і  $D_\infty$  узяті значення функції спектра від  $-200$  до  $200$ . Всі зображення структури валкового чавуну розміром  $10 \times 15$  см при збільшеннях  $\times 100$ ,  $\times 200$ ,  $\times 500$  і  $\times 1000$  були переведені в електронний вид шляхом сканування фотознімків і збільшені в 4 рази для якісного відображення рельєфу поверхні.

На рис. 10. наведено структурні складові робочої зони металевих бочок сортопрокатних чавунних валків з розрахованими програмним шляхом фрактальними розмірностями.

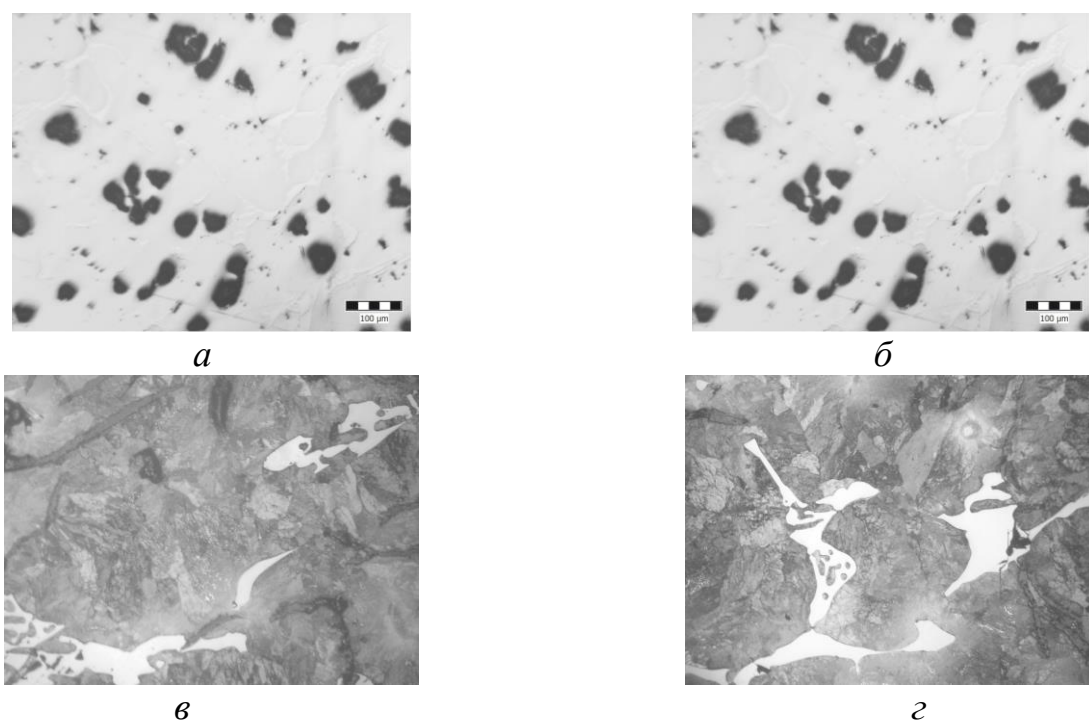


Рис. 10. Мікроструктура валкового чавуну виконання СШХН-50 (*а, б*) і валкового чавуну виконання СШХН-43 (*в, з*): фрактальні розмірності графіту 1,81 (*а*) та 1,92 (*б*); фрактальні розмірності ледебуриту 1,68 (*в*) та 1,79 (*з*); *а, б* – не травлено,  $\times 100$ , *в, з* – травлення  $\text{HNO}_3$ ,  $\times 200$

На рис. 11 наведені результати програмного обчислення спектра статистичних розмірностей.

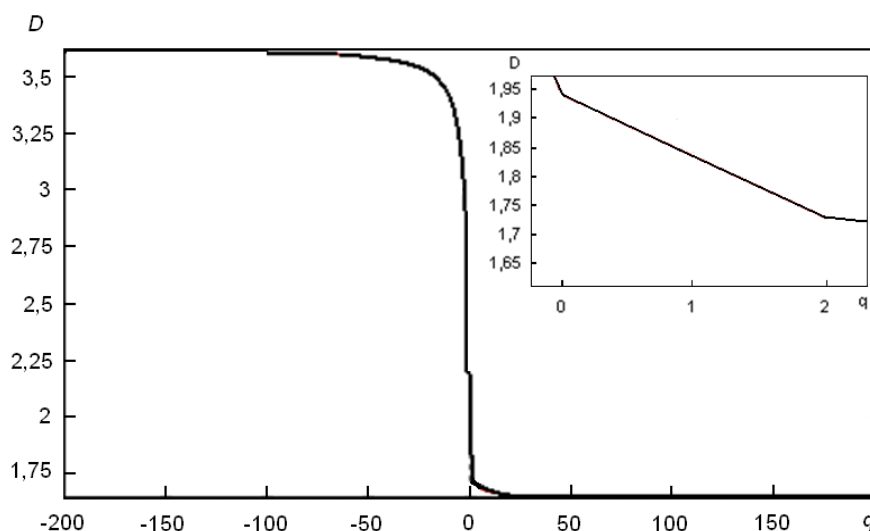


Рис. 11. Спектр розмірностей, обчислених для пластинчастого графіту валкового чавуну виконання СШХН-45:

$D_0 = 1,94$ ;  $D_1 = 1,84$ ;  $D_2 = 1,73$ ;  $D_{200} = 1,65$ ;  $D_{-200} = 3,62$ . У правому верхньому куті рисунка показана збільшена ділянка спектра розмірностей в інтервалі  $0 < q < 2$

При зіставленні оцінок розмірності елементів структури валкового матеріалу з механічними властивостями розраховували чутливість  $K_i$  між даними характеристиками по формулі В.І. Большакова, Ю.І. Дуброва:

$$K_i = |Y_i - Y_{i+1}| / |X_i - X_{i+1}|, \quad (28)$$

де  $X_1$  і  $X_2$  – два числа, що характеризують критерій якості в заданих областях  $i = 1, \dots, n$  досліджуваного матеріалу та  $Y_1$  і  $Y_2$  – відповідні їм чисельні значення розмірностей, отриманих в тих областях, де визначали даний критерій.

Як показав дослід, найбільша чутливість спостерігається між механічними властивостями чавуну та фрактальними, інформаційними і кореляційними розмірностями карбідів та графіту. Надалі взаємозв'язок встановлювався тільки між цими найбільш чутливими характеристиками (рис. 12–15). Це дозволило збільшити вірогідність прогнозу механічних властивостей до 20% по отриманим рівнянням регресії (29-45), що відображають їх адекватність.

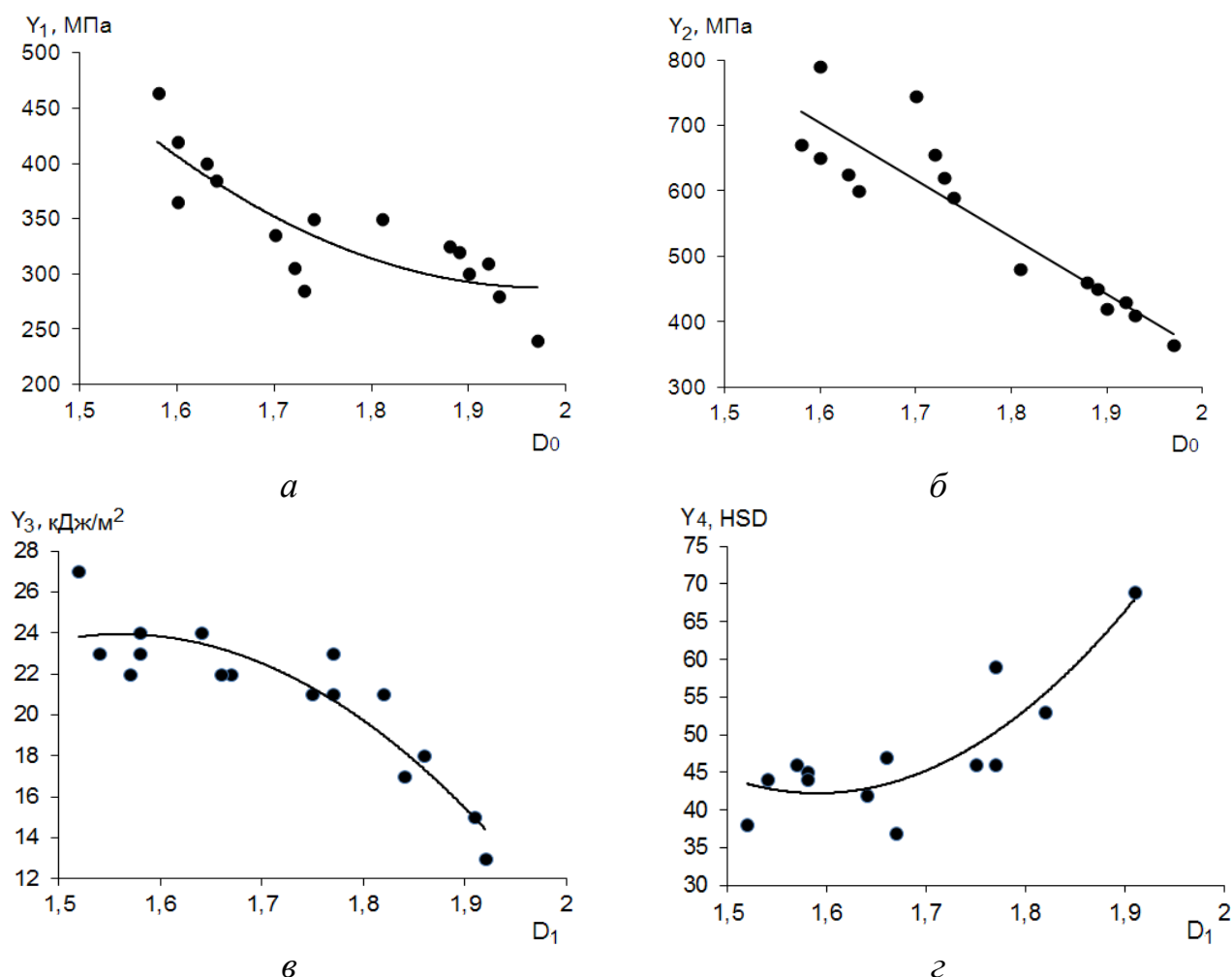


Рис. 12. Залежність межі міцності на розрив –  $Y_1$ , межі міцності на згин –  $Y_2$  від фрактальної розмірності пластинчастого графіту –  $D_0$  (а, б), ударної в'язкості –  $Y_3$  і твердості –  $Y_4$  від інформаційної розмірності пластинчастого графіту –  $D_1$  (в, г) валків виконання СПХН

$$Y_1 = 834,03 \cdot D_0^2 - 3299,1 \cdot D_0 + 3550; \quad r^2 = 0,70 \quad (29)$$

$$Y_2 = -874,36 \cdot D_0 + 2103,2; \quad r^2 = 0,83 \quad (30)$$

$$Y_3 = -74,075 \cdot D_1^2 + 231,39 \cdot D_1 - 156,76; \quad r^2 = 0,84 \quad (31)$$

$$Y_4 = 252,22 \cdot D_1^2 - 802,42 \cdot D_1 + 680,43. \quad r^2 = 0,75 \quad (32)$$

Встановлені залежності дозволяють оцінювати ступінь впливу елементів структури чавуну на його механічні властивості. Границі включень пластинчастого графіту служать концентраторами мікронапружень, а збільшення його вмісту послабляє металеву матрицю чавуну, що свідчить про вплив на механічні властивості чавуну як вмісту, розмірів та розподілу графіту, так і форми самих включень. При цій формі графіту ефективно використовується лише 30-50% міцності металеві основи чавуну і практично відсутня можливість використання її пластичних властивостей. Аналіз спектра статистичних розмірностей параметрів структури валкового чавуну показав, що фрактальна розмірність досліджуваної фази більшою мірою залежить від форми і геометричних розмірів її елементів, а інформаційна та кореляційна розмірності залежать, в основному, від їх вмісту й розподілу. Спостерігається тенденція зменшення характеристик міцності валків при збільшенні фрактальної розмірності пластинчастого графіту (рис. 12 *a, б* та рівняння, що описують наведені залежності (29, 30)). Це певним чином обумовлено збільшенням його вмісту в чавуні від 0,5 до 2,5% і довжини включень – від ПГд45 до ПГд180, а також підвищенням вмісту нікелю з 0,99 до 1,17% по масі. Застосування традиційних методів балової оцінки геометричних характеристик пластинчастого графіту відповідно до ТУ В27.1-26524137-1291, дозволило для досліджуваних валків зафіксувати зміну форми графіту у відносно вузьких межах – ПГф1, ПГф2; розмірів – ПГд45-ПГд180; розподілу – ПГр1, ПГр2 і займаній площі – ПГ2 та ПГ4, що не дає можливості по цим даним оцінювати вплив на властивості з точністю, необхідною для практичних цілей. Зафіксовано зменшення показників ударної в'язкості при збільшенні інформаційної розмірності пластинчастого графіту (рис. 12 *в*) та одночасне збільшення твердості (рис. 12 *з*), що описуються поліномом другого ступеню (31) та (32) відповідно. Низькі значення твердості 36-46 HSD (рис. 12 *з*) спостерігаються при інформаційній розмірності графіту 1,52-1,68 і, крім того, частково обумовлені нерівномірним розподілом включень графіту ПГр2, а також низьким вмістом ледебуриту на рівні 8-14%. Ці результати свідчать про більший вплив на в'язкість і твердість розподілу графітних включень, ніж їх форми.

Карбіди (цементит та ледебурит) кристалізуються, в основному, у поверхневих шарах валків при інтенсивному відводі тепла від рідкого чавуну і мають високу твердість по Шору в межах 80-100 одиниць. Але їх високий вміст в чавуні одночасно підвищує крихкість його поверхневого шару. Вплив складної геометричної конфігурації форми карбідів на фізико-механічні властивості валкового матеріалу до кінця не досліджено, але отримані на рис. 13 *a-г* залежності свідчать, що такий зв'язок існує. Підвищення межі міцності на розрив (рис. 13 *a*) зафіксовано при зростанні фрактальної розмірності ледебуриту до 1,99, а на згин (рис. 13 *б*) – при зростанні його інформаційної розмірності до 1,98 та при займаній площі 20-35%. При зменшенні кореляційної розмірності ледебуриту з 1,86 до 1,58 зафіксовано зростання твердості робочої зони валків з HSD 37 до 70 (рис. 13 *з*, (36)), та одночасний спад показників ударної в'язкості з 27 до 13 кДж/м<sup>2</sup> (рис. 13 *в*, (35)), що частково обумовлено збільшенням вмісту ледебуриту з 8% до 35% та вуглецю з 2,84% до 3,32%.

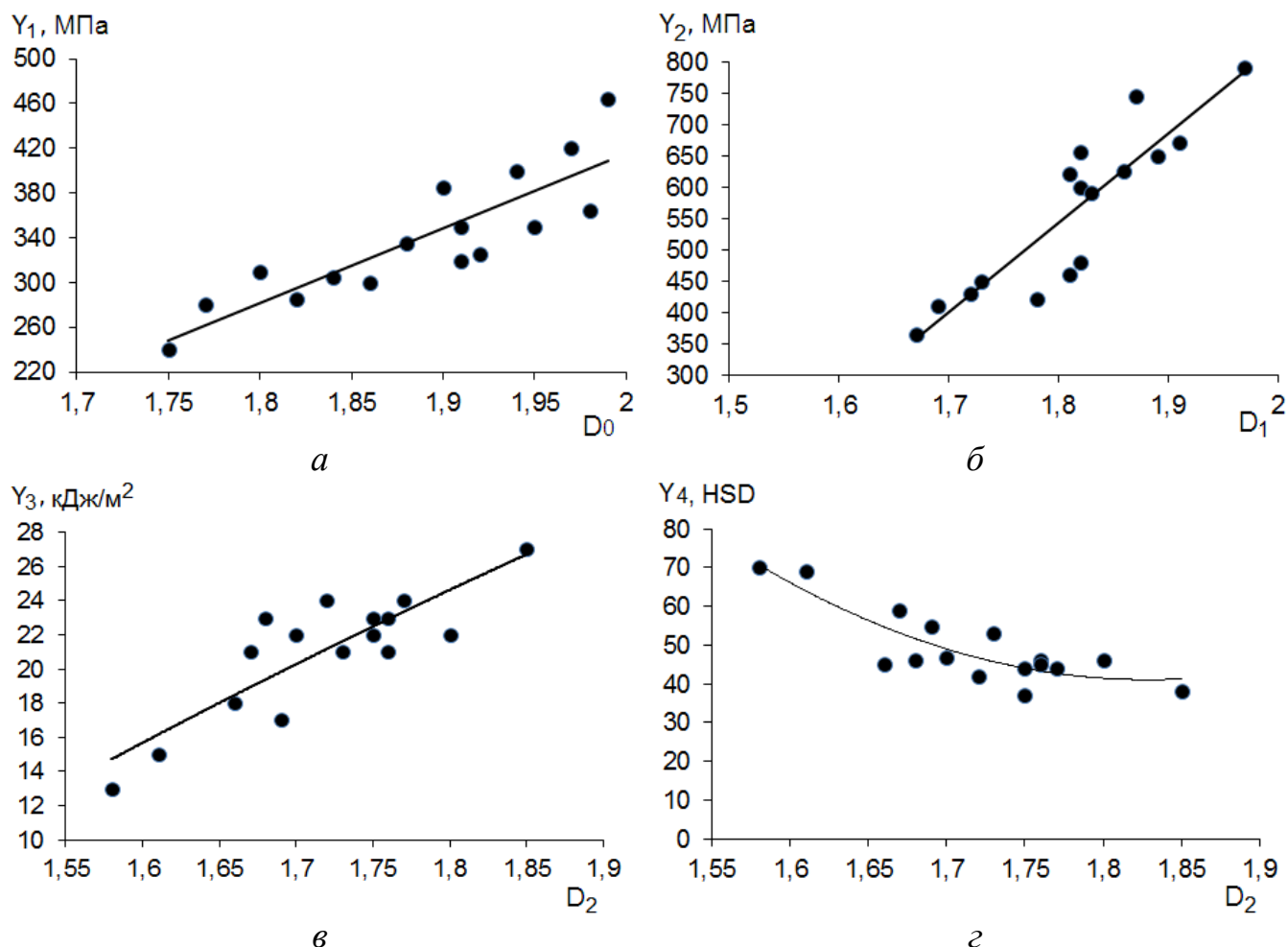


Рис. 13. Залежність межі міцності на розрив –  $Y_1$  (а) від фрактальної розмірності карбідів –  $D_0$ , межі міцності на згин –  $Y_2$  (б) від інформаційної розмірності карбідів –  $D_1$ , ударної в'язкості –  $Y_3$  (в) та твердості –  $Y_4$  (г) від кореляційної розмірності карбідів –  $D_2$  валків виконання СПХН

$$Y_1 = 667,89 \cdot D_0 - 918,72; \quad r^2 = 0,75 \quad (33)$$

$$Y_2 = 1432,20 \cdot D_1 - 2035,90; \quad r^2 = 0,80 \quad (34)$$

$$Y_3 = 75,89 \cdot \ln(D_2) - 19,989; \quad r^2 = 0,73 \quad (35)$$

$$Y_4 = 478,35 \cdot D_2 - 1749,8 \cdot D_2 + 1641,2. \quad r^2 = 0,72 \quad (36)$$

Для валків виконання СШХН зі структурою кулястого графіту, виходячи із аналізу графіків, наведених на рис. 14 а-в, збільшення показників якісних характеристик валкового чавуну відбувається по експоненціально-ступінному закону:  $\sigma_B$  з 230 до 460 МПа;  $\sigma_{згин}$  з 350 до 790 МПа; КС з 9 до 33 кДж/м<sup>2</sup> при зростанні фрактальної розмірності графіту з 1,51 (форма кулястого графіту) до топологічної розмірності 2 (форма компактного графіту). Показники твердості HSD зростають з 40 до 60 одиниць по лінійному закону при зменшенні показників інформаційної розмірності графіту з 1,92 до 1,58. Як впливає з наведених вище даних, форма графіту більше впливає на досліджувані механічні властивості валків, а розподіл графіту по об'єму – на їх твердість.

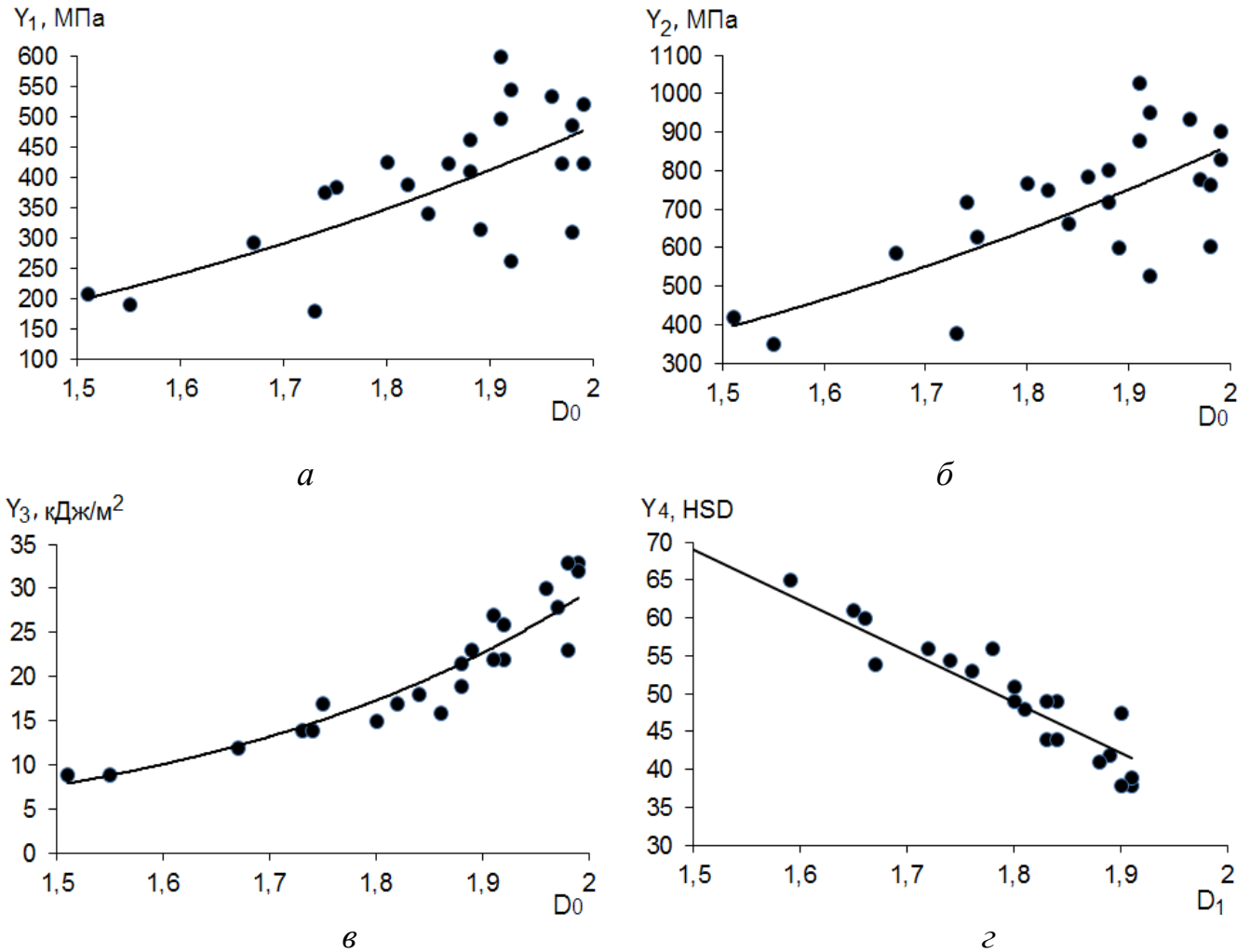


Рис. 14. Залежність межі міцності на розрив –  $Y_1$  (а), межі міцності на згин –  $Y_2$  (б), ударної в'язкості –  $Y_3$  (в) від фрактальної розмірності кулястого графіту –  $D_0$  та твердості –  $Y_4$  (г) від інформаційної розмірності кулястого графіту –  $D_1$  валків виконання СШХН

$$Y_1 = 55,185 \cdot D_0^{3,1302}; \quad r^2 = 0,51 \quad (37)$$

$$Y_2 = 126,000 \cdot D_0^{2,7811}; \quad r^2 = 0,54 \quad (38)$$

$$Y_3 = 0,1323 \cdot \exp(2,7074 \cdot D_0); \quad r^2 = 0,91 \quad (39)$$

$$Y_4 = -67,239 \cdot D_1 + 170. \quad r^2 = 0,90 \quad (40)$$

Спостерігається тенденція підвищення показників міцності (рис. 15 а, б, (37), (38)) і ударної в'язкості (рис. 15 в, (39)) при зменшенні кореляційної, інформаційної і фрактальної розмірностей ледебуриту та підвищення показників твердості при зростанні його фрактальної розмірності (рис. 15 г, (40)). Це свідчить про вплив геометричних характеристик графітних включень кулястого графіту: конфігурації форми, кількості та розподілу на показники якості валкового чавуну виконання СШХН.

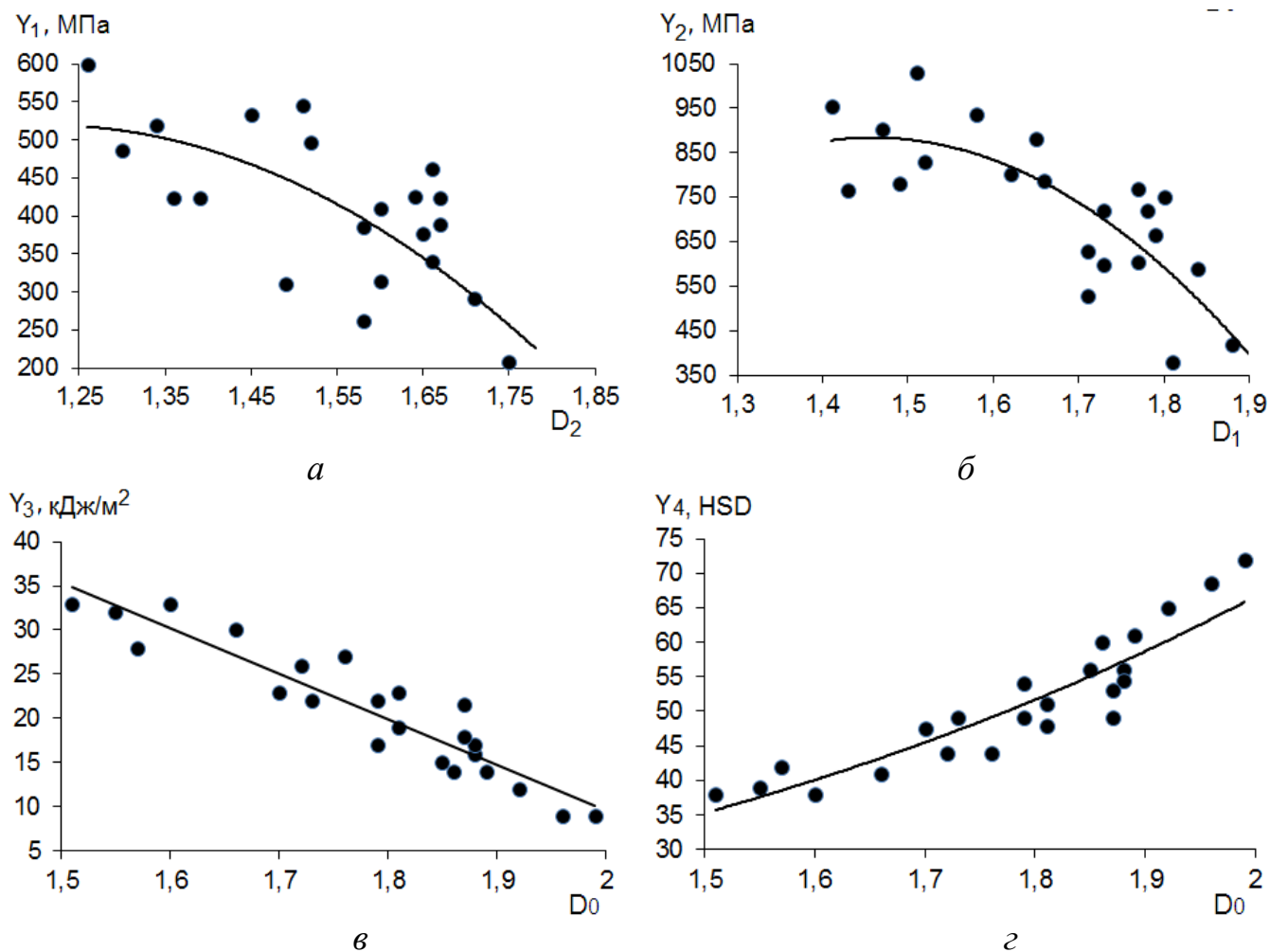


Рис. 15. Залежність межі міцності на розрив –  $Y_1$  (а) від кореляційної розмірності карбідів  $D_2$ , межі міцності на згин –  $Y_2$  (б) від інформаційної розмірності карбідів –  $D_1$ , ударної в'язкості –  $Y_3$  (в) та твердості –  $Y_4$  (г) від фрактальної розмірності карбідів –  $D_0$  валків виконання СШХН

$$Y_1 = -907,09 \cdot D_2^2 + 2198,30 \cdot D_2 - 812,48; \quad r^2 = 0,85 \quad (41)$$

$$Y_2 = -2497,70 \cdot D_1^2 + 7286,50 \cdot D_1 - 4430,20; \quad r^2 = 0,69 \quad (42)$$

$$Y_3 = -51,52 \cdot D_0 + 112,66; \quad r^2 = 0,87 \quad (43)$$

$$Y_4 = 5,2061 \cdot \exp(1,2751 \cdot D_0). \quad r^2 = 0,86 \quad (44)$$

Аналіз отриманих результатів показав перспективність застосування теорії мультифракталів для кількісної оцінки наведених елементів структури сортопрокатних чавунних валків зі складною геометричною конфігурацією. Розходження між показниками якості чавуну, отриманими за допомогою їх оцінки з використанням теорії мультифракталів, та показниками якості, отриманими в результаті проведення прямих експериментів, підтверджують неповноту існуючої формальної аксіоматики детермінованого опису досліджуваних явищ, що ініціює необхідність створення більш глибокого, можливо і статистичного, аналізу цього опису, як, наприклад, це показано в роботах Вад.І. Большакова, В.І. Большакова, В.М. Волчука, Ю.І. Дуброва. Виявлено відхилення показників розмірності

параметрів структури при їх розрахунках, що не перевищують  $\pm 0,06$  – для валків виконання СПХН та  $\pm 0,05$  – для валків виконання СШХН.

Такий підхід дозволяє використовувати оцінки розмірності графіту та карбідів, зокрема ледебуриту, для прогнозу та коригування показників якості валкового чавуну по отриманим рівнянням (29-44) поряд з традиційними геометричними характеристиками елементів структури: формою, розподілом, розмірами та вмістом.

У шостому розділі описане впровадження методу оцінки механічних властивостей валкового чавуну, що проводили на підприємстві ПАТ ДЗПВ (акт №22-1 від 14.10.2013 р.).

Впровадження програми (рис. 16) на ПАТ ДЗПВ дозволило проводити оперативну оцінку механічних властивостей валкового чавуну виконання СПХН, СШХН з використанням рівнянь пасивного (1-16) та активного (17-24) експериментів.

### Механічні властивості чавунних валків (ПАТ ДЗПВ) ✕

**Вибір валка**

**Хімічний склад в % по масі (за ТУ Ч 14-2-1188)**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
<input type="text" value="3"/>	<input type="text" value="0.76"/>	<input type="text" value="0.53"/>	<input type="text" value="0.006"/>	<input type="text" value="0.009"/>	<input type="text" value="0.5"/>	<input type="text" value="1.03"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>

**Область валка**

**Твердість по Шору, HSD (Держстандарт 23273)**

<b>Металографічний аналіз (Держстандарт 3443)</b>				
Перліт, %	Ферит, %	Карбіди, %	Графіт, %	Бейніт, %
<input type="text" value="89"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="10"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="0"/>
Мартенсит, %	Аустеніт залишковий, %	Сорбіт, %	Графіт (Шкала 1Б та Шкала 3Б)	
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="ПГд90"/>	

**Механічні властивості чавунного валка :**

Межа міцності на розрив: 320 МПа  
з урахуванням похибки (P=0,03) довірчий інтервал знаходиться в межах  $\pm 10$ (МПа)

Межа міцності на згин: 578 МПа  
з урахуванням похибки (P=0,03) довірчий інтервал знаходиться в межах  $\pm 17$ (МПа)

Ударна в'язкість: 18,6 Дж/м<sup>2</sup>  
з урахуванням похибки (P=0,03) довірчий інтервал знаходиться в межах  $\pm 1$ (Дж/м<sup>2</sup>)

Рис. 16. Мнемонічне зображення комп'ютерної реалізації програми впровадження

Отримані результати прогнозу показників якості досліджуваних сортопрокатних валків дозволило внести зміни до технологічного регламенту їх виробництва шляхом коригування хімічного складу чавуну. Відносна похибка методики складає 6,5%.

Щорічний очікуваний економічний ефект становить 355,2 тис. грн. за оцінками обсягу продукції, що випускають на ПАТ ДЗПВ.



## ВИСНОВКИ

У дисертації наведене теоретичне узагальнення і нове вирішення актуальної науково-практичної проблеми, що виявляється в підвищенні зносостійкості сортопрокатних чавунних валків із застосуванням системного підходу, що базується на розробці та впровадженні математичних моделей оцінки критеріїв якості в залежності від хімічного складу, параметрів структури та експлуатаційних факторів.

Розроблено матеріалознавчі основи, що полягали у підвищенні зносостійкості сортопрокатних валків на основі створення методики прогнозу, заснованої на аналізі результатів технологічного процесу та статистичних даних за тривалий період часу (механічних властивостей, експлуатаційних факторів) з мінімальними матеріально-часовими витратами та з точністю, що задовольняє технічним вимогам.

Найважливіші наукові та практичні результати роботи зведені до наступного:

1. Проаналізовано світовий досвід технології виробництва чавунних сортопрокатних валків, сучасні методи оцінки якості валків та тенденції їх розвитку. В роботі виконано аналіз причин зниження зносостійкості валків виконання СПХН та СШХН і показано, що існує проблема її підвищення, яку можна вирішити шляхом розробки і впровадження математичних моделей прогнозу, заснованих на аналізі результатів технологічного процесу та статистичних даних.

2. Проведено статистичний аналіз механічних властивостей ( $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD) робочої зони бочок промислових сортопрокатних валків виконань СПХН (41...65) (вибірка по 320 плавкам  $\sim$  930 тонн) та СШХН (41...50) (вибірка по 283 плавкам  $\sim$  800 тонн) виробництва ПАТ ДЗПВ та реалізовано математичну модель їх прогнозу в залежності від хімічного складу та параметрів структури, представлену у вигляді бази даних з рівнянь ( $R=0,73...0,98$ ). Для валків виконання СПХН робоча область існування властивостей обмежена наступними межами:  $\sigma_B \approx 220...380$  МПа,  $\sigma_{згин} \approx 390...840$  МПа,  $КС \approx 8...25$  кДж/м<sup>2</sup>,  $HSD \approx 40...70$ ; валків – СШХН:  $\sigma_B \approx 240...460$  МПа,  $\sigma_{згин} \approx 330...940$  МПа,  $КС \approx 9...33$  кДж/м<sup>2</sup>,  $HSD \approx 40...60$  з урахуванням всього діапазону застосовуваних умов охолодження в металевій формі. Для оперативного використання при здавальних випробуваннях валків отримані гістограми, що характеризують ступінь впливу елементів хімічного складу валків на механічні властивості.

3. Вперше з використанням модернізованого активного експерименту визначено діапазон параметрів структури та елементів хімічного складу валків, у якому критерії якості відповідають стабільним показникам (Свідоцтво про реєстрацію авторського права України на твір № 54703 від 12.05.2014 р.). Для валків виконання СПХН межі обраних параметрів наступні: 2,95...3,30% С, 0,91...1,50% Si, 0,54...0,75% Mn, 0,080...0,200% P, 0,004...0,031% S, 0,56...1,20% Cr, 0,80...1,40% Ni, 12...30% карбідів, 0,5...2% пластинчастого графіту, 45...180 ПГд. Для валків виконання СШХН: 3,00...3,40% С, 1,45...1,80% Si, 0,45...0,65% Mn, 0,040...0,200% P, 0,004...0,010% S, 0,60...0,90% Cr, 0,70...1,30% Ni, 0,035...0,056% Mg, 9...25% карбідів, 0,5...2,5% кулястого графіту, 45...180 ШГд. Отримано рівняння регресії, що дозволяють оцінити  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD валків у виділеній зоні робочої області з похибкою 4,3...8,6%.

4. Вперше визначена область з найбільш ефективним поєднанням механічних властивостей  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD (область компромісу) по встановленим межам вмісту компонентів хімічного складу та параметрів структури (Свідоцтво про реєстрацію авторського права України на твір №53769 від 18.02.2014 р.). Реалізація цього методу дозволяє встановлювати пріоритет на комплекс механічних властивостей валка, прогнозувати зміни технологічного процесу та автоматично визначати хімічний склад валка. Дано рекомендації в діючі галузеві ТУ з найбільш ефективного поєднання властивостей  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{згин}$ , КС і HSD по встановленим межам вмісту компонентів хімічного складу та параметрів структури.

5. Розроблено та програмно реалізовано математичні моделі прогнозу зносостійкості робочої зони бочок матеріалу валків в залежності від експлуатаційних характеристик та твердості (вибірка ~ 500 валкам). Очікуваний щорічний економічний ефект складає 720 тис. грн. за обсягами продукції ПАТ ДЗПВ.

6. Вперше із застосуванням теорії мультифракталів встановлена кореляція між оцінками розмірності графіту і карбідів робочої зони металевих бочок валків та їх механічними властивостями (Свідоцтво про реєстрацію авторського права України на твір № 54703 від 12.05.2014 р.), що дозволяє за допомогою отриманих закономірностей коригувати розрахунки по прогнозу властивостей валків по їх розмірносним характеристикам. Експериментально встановлено, що при збільшенні фрактальної розмірності пластинчастого графіту від  $1,58 \pm 0,06$  до  $1,97 \pm 0,06$  знижуються показники міцності на розрив на 160 МПа, а показники міцності на згин – на 400 МПа. Показники ударної в'язкості зменшуються з  $27 \text{ кДж/м}^2$  до  $13 \text{ кДж/м}^2$  при зростанні інформаційної розмірності карбідної складової від  $1,5 \pm 0,05$  до  $1,99 \pm 0,05$ . При збільшенні фрактальної розмірності кулястого графіту від  $1,50 \pm 0,05$  до 2 підвищуються показники міцності на розрив на 200 МПа, а показники міцності на згин – на 290 МПа.

7. Для оперативного використання при здавальних випробуваннях валків реалізована та впроваджена на металургійному підприємстві ПАТ «Дніпропетровський завод прокатних валків» методика прогнозу якості валків у вигляді програмного забезпечення. Відносна похибка методики складає 6,5%. Очікуваний щорічний економічний ефект становить 355,2 тис. грн. за обсягами продукції ПАТ ДЗПВ.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові положення:

1. Волчук В.Н. Фракталы в материаловедении: монография [Текст] / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров – Дн-вск: ПГАСА, 2006. – 253 с.
2. Волчук В.Н. Разработка и исследование метода определения механических свойств металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // Металознавство та термічна обробка металів. – 2004. – №1. – С. 43–54.
3. Волчук В.М. Удосконалення способу визначення фрактальної розмірності металу на основі використання різних методів розрахунків / В.І. Большаков, В.М. Волчук,

- Ю.І. Дубров, В.В. Скалозуб // *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2004. – №2–3. – С. 34–39.
4. Волчук В.Н. Разработка и исследование экспресс-метода прогнозирования свойств термообработанной малоуглеродистой стали / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров, В.М. Грачова // *Строительство, материаловедение, машиностроение.* – Дн-вск: ПГАСА, 2005.– Вып. 39, ч.1. – С. 169–173.
  5. Волчук В.Н. Выбор масштабного представления структуры металла для определения его механических свойств с применением фрактальных размерностей / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Строительство, материаловедение, машиностроение.* – Дн-вск: ПГАСА, 2007.– Вып. 41, ч.2. – С. 5–58.
  6. Волчук В.Н. Применение мультифрактального формализма при идентификации структуры металла и ее связь с качественными характеристиками / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Металловедение и термическая обработка.* – Харьков: ФТИ, 2008. – С. 260–265.
  7. Волчук В.Н. Предпосылки применения мультифрактального формализма в материаловедении / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Строительство, материаловедение, машиностроение.* – Дн-вск: ПГАСА, 2008.– Вып. 45, ч.2. – С. 18–30.
  8. Волчук В.Н. Особенности применения мультифрактального формализма в материаловедении / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Доповіді НАН України.* – 2008. – №11. – С. 99–107 (SCOPUS).
  9. Волчук В.Н. Применение вейвлет-анализа для оценки зеренной структуры металлов / В.Н. Волчук // *Металознавство та термічна обробка металів.* – Дн-вськ. – 2009. – №4. – С. 5–13.
  10. Волчук В.Н. О возможности применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств стали / В.Н. Волчук // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: зб. наук. пр.* – Одеса: ОДАБА, 2010.– №38. – С. 115–121.
  11. Волчук В.Н. Исследование микроструктурной однородности стали У8 с применением мультифрактального анализа / В.И. Большаков, В.Н. Волчук // *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2010. – №4. – С. 31–38.
  12. Волчук В.Н. Материаловедческие аспекты применения вейвлетно-мультифрактального подхода для оценки структуры и свойств малоуглеродистой стали / В.И. Большаков, В.Н. Волчук // *Металлофиз. и новейшие технол.* – 2011. – Т. 33. – №3. – С. 347–360 (SCOPUS).
  13. Волчук В.М. Етапи ідентифікації багатопараметричних технологій та шляхи їх реалізації / В.І. Большаков, В.М. Волчук, Ю.І. Дубров // *Вісник НАН України.* – 2013. – №8. – С. 66–72 (SCOPUS).
  14. Волчук В.Н. Идентификация многопараметрических, многокритериальных технологий и пути их практической реализации / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Металознавство та термічна обробка металів.* – 2013. – №4. – С. 5–11.

15. Волчук В.Н. Пути прогноза механических свойств прокатных валков / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2014. – №1. – С. 19–40.
16. Волчук В.М. Часткова компенсація неповноти формальної аксіоматики при ідентифікації структури металу / Вад.І. Большаков, В.І. Большаков, В.М. Волчук, Ю.І. Дубров // *Вісник НАН України*. – 2014. – №12. – С. 45–48 (SCOPUS).
17. Волчук В.Н. О прогнозировании качества целевого продукта в периодических технологиях / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Доповіді НАН України*. – 2014. – №11. – С. 77–81 (SCOPUS).
18. Волчук В.Н. Исследования влияния химического состава чугуновых прокатных валков на их механические свойства / В.Н. Волчук. // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури: зб. наук. пр.* – Д.: ПДАБА, 2014. – № 5. – С. 12–17.
19. Волчук В.Н. К вопросу о применении теории мультифракталов для оценки механических свойств металла / В.Н. Волчук // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2014. – №3. – С. 12–19.
20. Волчук В.Н. Применение теоретико-информационного подхода для идентификации структуры металла / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури: зб. наук. пр.* – Д.: ПДАБА, 2014. – №8. – С. 4–9.
21. Волчук В.М. Прогнозування та керування якісними характеристиками прокатних валків / В.І. Большаков, В.М. Волчук, Ю.І. Дубров // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури: зб. наук. пр.* – Д.: ПДАБА, 2014. – №9. – С. 9–14.
22. Волчук В.Н. Определение области компромисса критериев качества чугуновых валков / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури: зб. наук. пр.* – Д.: ПДАБА, 2014. – №11. – С. 4–7.

Опубліковані праці апробаційного характеру:

23. Волчук В.Н. Об оценке погрешности аппроксимации / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Моделирование и оптимизация в материаловедении – МОК-43*. – Одесса: Астропринт, 2004. – С. 152–154.
24. Волчук В.Н. Об уточнении метода вычисления плотности дислокаций / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Моделирование и оптимизация в материаловедении – МОК-44*. – Одесса: Астропринт, 2005. – С. 157–158.
25. Волчук В.Н. Формирование модели прогноза качества материала, основанной на экспертной оценке и активном эксперименте / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Л.Н. Дейнеко, Ю.И. Дубров // *Компьютерное материаловедение и обеспечение качества. – МОК-45*. – Одесса: Астропринт, 2006. – С. 146–150.
26. Волчук В.Н. Адекватный масштаб представления структуры металла для идентификации его механических свойств с применением языка фрактальной геометрии / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // *Моделирование в*

- комп'ютерному матеріалознавстві. – МОК-46. – Одеса: Астропринт, 2007. – С. 189–191.
27. Волчук В.Н. Погрешность в определении фрактальной размерности структуры материала, как функция ее масштабного представления / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // Компьютерное материаловедение и прогрессивные технологии. – МОК-47. – Одеса: Астропринт, 2008. – С. 13.
28. Волчук В.Н. Применение теории мультифракталов для оценки механических свойств чугуновых валков / В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров // Материалы XVI международной конференции “Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности и экономике”. – Санкт-Петербург: СПбГПУ. Вып. 5. – 2013 – С. 196–199.

Опубліковані праці, які додатково відображають наукові результати:

29. Декларативний патент на корисну модель. 14183А України, G06K9/00. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення / В.І. Большаков, Ю.І. Дубров, Т.С. Василенко, В.М. Волчук. – Зареєстр. 12.09.05: Опубл. 15.05.06, Бюл. № 5.
30. Волчук В.М. Науковий твір “Способ определения области компромисса критериев качества многокритериальных технологий” / В.І. Большаков, В.М. Волчук, Ю.І. Дубров / Свідоцтво про реєстрацію авторського права України на твір № 53769 від 18.02.2014 р.
31. Волчук В.М. Науковий твір “Спосіб прогнозування та керування якісними характеристиками прокатних валків в технології їх виробництва” / В.І. Большаков, В.М. Волчук, Ю.І. Дубров / Свідоцтво про реєстрацію авторського права України на твір № 54703 від 12.05.2014 р.
32. Волчук В.М. Науковий твір “Способ экспресс оценки качества металла” / В.І. Большаков, В.М. Волчук, Ю.І. Дубров / Свідоцтво про реєстрацію авторського права України на твір № 54704 від 12.05.2014 р.

## АНОТАЦІЯ

**Волчук В.М. Розробка наукових основ формування та оцінки механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків для підвищення їх зносостійкості. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – матеріалознавство. – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпропетровськ, 2015.

В дисертаційній роботі вирішена важлива науково-практична проблема підвищення зносостійкості сортопрокатних валків шляхом розробки і впровадження математичної моделі, основаної на оцінці їх механічних властивостей в залежності від хімічного складу, параметрів структури та факторів експлуатації.

Для оцінки механічних властивостей чавунних прокатних валків реалізовані наступні етапи роботи: 1. Визначення робочої області багатопараметричної технології. 2. Визначення раніше невідомої частини робочої області

багатопараметричної технології, що включає виявлення керованих змінних і їх чисельних значень, при яких обрані критерії поліпшуються. 3. Виявлення в робочій області області компромісу критеріїв якості. 4. Оцінка можливості застосування теорії мультифракталів для прогнозу механічних властивостей валків.

Розроблено математичну модель прогнозу зносостійкості робочої зони бочок матеріалу валків, що основана на оцінці їх механічних властивостей з урахуванням хімічного складу, параметрів структури та факторів експлуатації. Очікуваний щорічний економічний ефект від впровадження методики прогнозу зносостійкості складає 720 тис. грн., а від впровадження методики прогнозу механічних властивостей – 355,2 тис. грн. за оцінками обсягу продукції, що випускається на ПАТ ДЗПВ.

**Ключові слова:** прокатні валки, механічні властивості, зносостійкість, мікроструктура, теорія мультифракталів, пасивний і активний експерименти.

## АННОТАЦИЯ

**Волчук В.Н. Разработка научных основ формирования и оценки механических свойств сортопрокатных чугуновых валков для повышения их износостойкости. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.02.01 – материаловедение. – Государственное высшее учебное заведение «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры» Министерства образования и науки Украины, Днепропетровск, 2015.

В диссертации решена важная научно-практическая проблема повышения износостойкости сортопрокатных валков путем разработки и внедрения математической модели, основанной на оценке их механических свойств в зависимости от химического состава, параметров структуры и факторов эксплуатации.

Решение проблемы оценки механических свойств чугуновых прокатных валков для повышения их износостойкости стало возможным благодаря реализации следующих этапов работы: 1. Определение рабочей области многопараметрической технологии. 2. Определение ранее неизвестной зоны рабочей области многопараметрической технологии, включающей выявление управляемых переменных и их численных значений, при которых выбранные критерии улучшаются. 3. Обнаружение в рабочей области области компромисса критериев качества. 4. Оценка возможности применения теории мультифракталов для прогноза механических свойств валков.

Первый этап работы реализован с применением пассивного эксперимента для определения рабочей области механических свойств чугуновых валков. Пассивный эксперимент, как правило, основывается на репрезентативном объеме статистической информации о предыстории работы данной технологии на протяжении длительного времени ее эксплуатации. Это позволяет получать уравнения, ставящие в соответствие критерии, по которым определяется работоспособность и эффективность данной технологии, и ее управляемые переменные. Для реализации второго этапа работы была разработана модификация

активного эксперимента, которая позволяет провести эксперимент на реальном объекте в промышленных условиях. Поэтому, на втором этапе предлагается экспертам по данной технологии назначить ту зону рабочей области, в которой показатели качества целевого продукта, по их мнению, могут принимать субоптимальные значения. При этом матрица планирования активного эксперимента, которая представляет собой своеобразную базу данных, реализующую заданную ограничениями область значений функции цели. Первая часть, это строки матрицы планирования, в которых допускается проведение прямых экспериментов на реальном объекте. Вторая часть матрицы планирования – это та часть, в которой прямые эксперименты проводить невозможно. Реализация этой части матрицы базируется на данных, получаемых путем эвристических процедур, которые, в данном случае, заключаются в том, что ранее назначенные эксперты, в указанных строках матрицы планирования дают численные оценки показателям качества целевого продукта, которые инициированы строками этой матрицы. Для достоверности полученных от экспертов результатов используются данные пассивного эксперимента. Третья часть матрицы планирования включает строки, в которых эксперты (по каким-либо причинам) не смогут сделать достоверную оценку показателей качества целевого продукта. В этом случае предлагается, для прогноза результатов, которые продиктованы соответствующими строками матрицы планирования, использовать существующие теоретические предпосылки и представления об исследуемой технологии, которые позволяют сделать необходимый прогноз механических свойств прокатных валков, как это показано в работе. В результате реализации активного эксперимента полученные уравнения позволяют определять механические свойства валков со стабильными показателями. На третьем этапе определена область с наиболее эффективным сочетанием свойств  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{изг}$ , КС и HSD рабочей зоны бочек валков исполнений СПХН, СШХН по определённым границам содержания компонентов химического состава и параметров структуры (их пределу). Его реализация позволяет устанавливать приоритет со стороны заказчика на конкретное механическое свойство валка, прогнозировать изменения технологического процесса и автоматически определять химический состав валка. Для валков исполнения СПХН эта область (область компромисса) ограничена следующими пределами:  $\sigma_B \approx 220 \div 380$  МПа,  $\sigma_{изг} \approx 390 \div 840$  МПа, КС  $\approx 8 \div 25$  кДж/м<sup>2</sup>, HSD  $\approx 40 \div 70$ ; валков – СШХН:  $\sigma_B \approx 240 \div 460$  МПа,  $\sigma_{изг} \approx 330 \div 940$  МПа, КС  $\approx 9 \div 33$  кДж/м<sup>2</sup>, HSD  $\approx 40 \div 60$  с учетом всего диапазона применяемых условий охлаждения в металлической форме. Дана рекомендация в действующие ТУ по наиболее эффективному сочетанию свойств  $\sigma_B$ ,  $\sigma_{изг}$ , КС и HSD по определённым границам содержания компонентов (их пределу). На четвертом этапе с применением теории мультифракталов определены размерностные характеристики элементов структуры, что позволило их использовать в уравнениях прогноза качества валкового чугуна.

Разработана математическая модель прогноза износостойкости рабочей зоны бочек материала валков, основанная на оценке их механических свойств с учетом химического состава, параметров структуры и факторов эксплуатации. Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения данной методики составляет

720 тыс. грн.; от внедрения методики прогноза механических свойств – 355,2 тыс. грн по оценкам объема выпускаемой продукции на ПАО ДЗПВ.

**Ключевые слова:** прокатные валки, механические свойства, износостойкость, микроструктура, теория мультифракталов, пассивный и активный эксперименты.

## THE SUMMARY

**Volchuk V.M. Development of scientific bases of formation and evaluation of mechanical properties of cast iron section rolling rolls to increase their durability. – On the rights of manuscript.**

The dissertation on completion of a scientific degree of a doctor of engineering on the speciality 05.02.01 – materials science. – State Higher Educational Establishment “Prydniprov’ska State Academy of Civil Engineering and Architecture”, of Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipropetrovs’k, 2015.

In this dissertation solved an important scientific and practical problem of improving the wear resistance of section rolling rolls through the development and implementation of a mathematical model based on an assessment of their mechanical properties, depending on the chemical composition, structure parameters and factors operating.

To evaluate the mechanical properties of cast iron mill rolls has the following stages of work: 1. Determination of a multiparameter workspace technology. 2. Determination of a previously unknown zone workspace multiparameter technology including identification of the controlled variables, and their numerical values at which the selected criteria are improved. 3. Detection in the workspace area compromise the quality criteria. 4. Evaluation of the possibility of using multifractal theory for the prediction of the mechanical properties of the rolls.

A mathematical model for prediction of wear resistance of the working area of drums roll material, based on an assessment of their mechanical properties, taking into account the chemical composition, structure parameters and operation factors. Expected annual economic effect of the introduction of this technique is 720 thousand UAH; from the introduction of the mechanical properties of the forecast methodology – 355,2 thousand UAH estimated production volume for PАО DZPV.

**Keywords:** mill rolls, mechanical properties, wear resistance, microstructure, the theory of the multifractals, passive and active experiments.

Підп. до друку 13.04.2015 Формат А4. Папір офсетний. Гарнітура times new roman. Друк офсетний.  
Ум. друк. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. № 152.

Видавництво «Літограф»

Адреса видавництва та друкарні: 49000, Дніпропетровськ, вул. Паторжинського, 29-б  
Тел.: (066) 369-21-55, (056) 713-57-25 Е-mail: litograf.dp@gmail.com