

Міністерство освіти і науки України

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ
УНІВЕРСИТЕТ

Глушкова Д. Б.,
Волчук В. М.

**ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ ФРАКТАЛІВ ДЛЯ
МОДЕЛЮВАННЯ СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ
МАТЕРІАЛІВ**

Монографія

Харків
ХНАДУ
2023

*Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради
Харківського національного автомобільно-дорожнього університету
(протокол № 57/23/5.11 від 22 вересня 2023 року).*

Рецензенти: **В.І. Большаков**, заслужений діяч науки та техніки України, доктор технічних наук, професор кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектури;
О.І. Бабаченко, доктор технічних наук, старший науковий співробітник, директор Інституту чорної металургії імені З.І. Некрасова Національної академії наук України;
В.В. Субботіна, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут».

Автори: **Д.Б. Глушкова**, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології металів та матеріалознавства імені О.М. Петриченка;
В.М. Волчук, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри матеріалознавства та обробки матеріалів Придніпровської державної академії будівництва та архітектур.

Глушкова Д.Б.
Г 12 Застосування теорії фракталів для моделювання структури та властивостей: монографія / Д.Б. Глушкова, В.М. Волчук. – Харків : 2023. – 225 с.

ISBN

Монографія «Застосування теорії фракталів для моделювання структури та властивостей» присвячена вирішенню наукової проблеми оцінки властивостей металевих матеріалів різного призначення (деталей об'ємного гідроприводу, гідромолоту, чавунних валків) на основі аналізу спектру фрактальних розмірностей їх структурних складових. Підвищення ефективності пар тертя деталей об'ємного гідроприводу шляхом вибору матеріалу для їх виготовлення та режимів його термічної обробки. Науково обґрунтована ефективність застосування іонно-плазмового методу для нанесення покриттів на робочі поверхні деталей. Створено спеціальне програмне забезпечення, що дозволяє оцінювати спектр статистичних розмірностей неоднорідних структур зі складною геометричною конфігурацією їх елементів. Результати теоретичних і експериментальних досліджень впроваджено у виробництво.

Монографія рекомендується для наукових співробітників, інженерів, викладачів закладів вищої освіти, аспірантів і студентів закладів вищої освіти, які спеціалізуються у сфері матеріалознавства та машинобудування.

ISBN

© Д.Б. Глушкова, В.М. Волчук, 2023

ЗМІСТ

	Стор.
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	5
ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ	10
1.1. Умови праці деталей об'ємного гідроприводу та причини виходу з ладу	10
1.2. Матеріали для деталей об'ємного гідроприводу	16
1.3. Методи підвищення зносо- та корозійної стійкості	40
1.4. Висновки та завдання дослідження	43
РОЗДІЛ 2. РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	45
2.1. Ідентифікація технологічних процесів	45
2.2. Передумови, цілі та завдання досліджень	48
2.3. Вимоги до показників якості цільового продукту	54
2.4. Існуючі методи оцінки якості цільового продукту	57
2.5. Передумови розробки методики оперативної оцінки якості цільового продукту	59
2.6. Обґрунтування методу оперативної оцінки якісних характеристик цільового продукту, що розробляється	62
2.7. Вибір змінних та обґрунтування критеріїв якості	74
2.8. Хімічний склад та структура	76
2.9. Результати експериментів та їх аналіз	90
2.10 Висновки по розділу	92
РОЗДІЛ 3. ВПЛИВ ПЛАЗМЕННИХ ПОКРИТТІВ НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ ОБ'ЄМНИХ ГІДРОПРИВОДІВ	94
3.1 Вибір складу плазмового покриття	94
3.2 Вибір оптимальних технологічних параметрів осадження плазмових покриттів	96
3.3 Структура та фазовий склад нанесених покриттів	102
3.4 Вплив плазмових покриттів на триботехнічні характеристики досліджуваних матеріалів	105
3.5 Визначення коефіцієнтів тертя	109
3.6 Дослідження характеристик міцності	110
3.7 Визначення нанотвердості та модуля пружності	112
РОЗДІЛ 4. ВСТАНОВЛЕННЯ ДОПУСТИМИХ ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВИХ ВІДНОСИН НА ПРИКЛАДІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ МУЛЬТИФРАКТАЛІВ	120
4.1. Про неповноту формальної аксіоматики у завданнях	120

ідентифікації характеристик якості	
4.2. Формалізація методики	139
4.3 Програмна реалізація алгоритму	152
4.4. Чутливість характеристик якості цільового продукту до змін вхідних параметрів	157
4.5 Встановлення взаємно однозначної відповідності між характеристиками якості та вхідними параметрами	170
РОЗДІЛ 5. ФРАКТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНІ ПЛАЗМЕННИХ ПОКРИТТІВ	180
5.1. Фрактальне моделювання механічних властивостей поверхні металу після іонно-плазменного хромування	180
5.2. Застосування сучасних методів фрактального формалізму для дослідження впливу плазменних покриттів на оцінювання зносостійкості деталей об'ємного гідроприводу	194
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	208

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РВ	Робоча область
ЗРО	Зона робочої області
ОК	Область компромісу
ЕС	Експертна система
БЗ	База знань
БД	База даних
ЛПР	Особа, яка приймає рішення (експерт)
$D_{0\text{ г}}$	Фрактальна розмірність графіту
$D_{1\text{ г}}$	Інформаційна розмірність графіту
$D_{2\text{ г}}$	Кореляційна розмірність графіту
$D_{0\text{ к}}$	Фрактальна розмірність карбідів
$D_{1\text{ к}}$	Інформаційна розмірність карбідів
$D_{2\text{ к}}$	Кореляційна розмірність карбідів
D_{200}	Статистична розмірність, що характеризує найбільш розріджений простір об'єкті спостереження (світлі ділянки елементів структури)
D_{-200}	Статистична розмірність, що характеризує найбільш концентрований простір в об'єкті спостереження (темні ділянки елементів структури)
HSD	Твердість по Шору
НВ	Твердість по Брінеллю
$\sigma_{\text{В}}$	Межа міцності на розрив (МПа)
$\sigma_{\text{изг}}$	Межа міцності на вигин (МПа)
КС	Ударна в'язкість (кДж / м ²)
ОУ	Загальний рівень

ІВ	Інтервал варіювання
НУ	Нижній рівень
ВУ	Верхній рівень
K_{σ_B}	Коефіцієнт чутливості межі міцності на розрив до розмірних характеристик
$K_{\epsilon_{гин}}$	Коефіцієнт чутливості межі міцності на вигин до розмірних характеристик
K_{K_C}	Коефіцієнт чутливості ударної в'язкості до розмірних характеристик
K_{HSD}	Коефіцієнт чутливості твердості до розмірних характеристик

ВСТУП

Провідну роль прискорення науково-технічного прогресу України грає машинобудування. Темпи його розвитку в значною мірою залежать від досягнень науки та техніки у галузі розробки високо технологічних процесів підвищення надійності праці різних типів деталей машин. Важливою ланкою роботи в цій галузі є подальше вдосконалення технології виготовлення об'ємних гідроприводів, які займають значне місце у машинах різного призначення, у тому числі будівельних машин.

Аналіз досвіду експлуатації цих машин [1, 2] показав, що основною причиною виходу їх з ладу є знос робочих поверхонь контртіл прецизійних вузлів тертя, а це тягне за собою збільшення витрат на технічне обслуговування та поточний ремонт.

Сучасні об'ємні гідромашини працюють в умовах високих швидкостей, тиску та температурних змін. Так, наприклад, в аксіально-поршневих гідромашинах частота обертання вихідного валу досягає 10000 об/хв та більше, тиск робочої рідини досягає 50 МПа, та її температура змінюється від -50°C до $+135^{\circ}\text{C}$.

У вузлах тертя (або трибосполучень) технічних систем знос поверхонь тертя залежить від таких факторів: природи поверхні тертя, матеріалу, його обробки й отримання структури, природи поверхні тертя, режимів навантаження, інтенсивності зношування. У зв'язку з цим велика увага приділяється проблема підвищення зносостійкості та корозійної стійкості поверхонь пар тертя.

Вибір матеріалів пар тертя, які забезпечують підвищення їх ресурсу вище досягнутого рівня – важливе завдання. Рішення її залежать від конструкції та призначення вузла, технології виробництва, умов експлуатації, від вимог до властивостей деталей,

терміну їх служби та надійності з урахуванням вартості матеріалів та їх дефіцитності, витрат на виготовлення деталей з обраного матеріалу та експлуатаційних витрат.

В арсеналі матеріалознавства є високотехнологічний спосіб зміни властивостей поверхонь – нанесення покриттів, що забезпечують вимоги експлуатаційних властивостей і характеристик.

Тому вивчення закономірностей зміни структури та властивостей матеріалів трибосистеми у процесі її роботи та розробки методів підвищення довговічності роботи деталей об'ємного гідроприводу є актуальним завданням. Але на дослідження даних властивостей і характеристик витрачаються значні кошти і час. Тому з метою зменшення матеріально-часових затрат на проведення натурних експериментів, в роботі описані дослідження авторів, що дозволяють оцінювати експлуатаційних властивостей і характеристики покриттів матеріалів із використанням теорії фракталів. Дана теорія дозволяє описувати реальні структури різної складності за допомогою дробної (фрактальної) розмірності для моделювання структури та властивостей. Шляхом дослідження коефіцієнтів чутливості фрактальної розмірності елементів структури з властивостями досліджуваних деталей об'ємного гідроприводу, гідромолота отримані моделі оцінки цих властивостей.

В монографії також розглянуті основні етапи ідентифікації технології виробництва чавунних валків з метою моделювання їх властивостей та структури. У металургійній промисловості на якість технологічних процесів може впливати, наприклад, якість вихідної сировини, заготовок, керовані змінні, якість інструментів, режими обробки і т.д. Система управління якістю цільового продукту, що організовується при кожній технологічній операції, у кращому випадку є оператив-

ною і працює в реальному масштабі часу. Виходячи з вище сказаного, в роботі розкриті основи впливу фрактальної розмірності структури чавунних валків на їх механічні властивості, що дозволить керувати властивостями валків в процесі їх виготовлення за рахунок використання отриманих математичних модеелй.

РОЗДІЛ 1

СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Умови праці деталей об'ємного гідроприводу та причини виходу з ладу

У процесі експлуатації об'ємні гідроприводи забезпечують безступінчастий широкий діапазон регулювання швидкості гідроциліндрів, можливість здійснення гнучкого зв'язку між двигуном насосу та гідродвигуном за рахунок застосування рукавів високого тиску, мінімальне співвідношення маси до потужності та крутного моменту [1].

Прикладами успішного використання об'ємного гідроприводу є [1, 2]:

- підйом атомного підводного човна з дна Баренцева моря за допомогою 26 гідроциліндрів зусиллям по 9000 кН кожен;
- експлуатація судновозної камери на Красноярській ГЕС, яка за допомогою об'ємного гідроприводу забезпечує проведення суден через греблю висотою 124 м. Гідропривід складається з 156 гідродвигунів загальною потужності 14400 кВт;
- сучасні збиральні комбайни оснащені об'ємними гідроприводами на базі аксіальних поршневих гідромашин.

В Україні виробляються об'ємні гідроприводи самої найширшої спрямованості: для будівельно-дорожніх машин, сільськогосподарської техніки, для верстатобудування ковальсько-пресового виробництва, авіації, суднових гідросистем, гірничо-шахтних розробок. Ціла низка підприємств займається ремонтом гідрообладнання у зв'язку з дорожнечею нового.

Розробками об'ємних гідроприводів в Україні займаються конструкторські бюро заводів [3–5], що випускає серійне гідрообладнання, спеціалізованих на їх широкому використанні («Дніпропрес», м. Дніпропетровськ, Новокраматорський машино-будівельний завод),

Харківське КБ з машинобудування імені А.А. Морозова (гідроприводу для наземно військової техніки та народного господарства), ТОВ «Промгідропривід» (м. Харків) – проектування гідроприводів для металургії та важкого машино-будування та ін.

Незалежно від призначення, надійність, працездатність, чутливість та інші важливі параметри гідроприводів залежать не тільки від вибору принципіальної схеми, її конструктивного виконання, але, як відзначають більшість розробників [6–9] від матеріалу, способу обробки поверхонь, ступінь їх геометричної точності. При аналізі агрегатів гідроприводу доцільно відзначити категорії деталей, аналогічних за призначенням та багато загальних технічних вимог до конструкцій (формі робочих поверхонь). Вони поділяються наступним чином:

- корпусні деталі насосів;
- незамкнених муфт та гідротрансформаторів;
- гільзи гідроциліндрів;
- корпусні деталі золотникових розподільників;
- плунжери, золотники, поршні;
- розподільники та опорні кільця аксіально-поршневих насосів;
- робочі колеса гідродинамічних передач.

Для вирішення завдань підвищення терміну експлуатації деталей об'ємного гідроприводу вчені приділяють багато уваги приділяють вивченню змін в структурі та властивостях поверхні деталей в процесі взаємного тертя (ковзання).

Як вказано в [9], зносостійкість металу визначається поєднанням структури та ряду властивостей:

Більшого опору, стиску, розтягу, згину, зсуву, високої твердості та пластичності при відсутності крихкості; стійкості механічних властивостей при високих температурах та тиску в умовах роботи на зношування.

Високий тепло- та температуропровідності; термодинамічної стійкості фаз у широкому інтервалі температур та тиску.

Стійкості проти корозії, високої насиченості та рівномірності розподілу легуючих елементів.

Такі властивості можуть бути створені при сприятливому поєднанні в'язкої та зміцнювальної фази – твердого розчину матриці та дисперсної змінної фази.

Автори [3] наголошують на необхідності близького орієнтування кристалів матриці та змінної дисперсної фази, що складає мінімальне значення міжфазної поверхневої енергії. Відомо [4, 5], що малі значення міжфазної поверхневої енергії різко підвищують швидкість процесів розчинення та виділення високодисперсних часток.

Створення в одному матеріалі цілого комплексу різних фізико-механічних та інших властивостей (наприклад, висока твердість в поєднанні з високою пластичністю) практично неможливо в однокомпонентному або багатокомпонентному сплаві, але реально в гетерогенному сплаві [4]. У цьому може бути досягнуто як сприятливе поєднання властивостей існуючих фаз, а й їх поліпшення завдяки взаємодії різних кристалічних решіток.

Фазові перетворення в процесі тертя вивчалася з допомогою методу безперервного рентгенографічного дослідження. Сутність методу полягає в тому, що в процесі тертя проводиться безперервне рентгенографічне дослідження одного з елементів пари в точці, яка знаходиться на певній відстані від точки виходу з контакту [5].

Використовуваний метод ефективний для вивчення динаміки тертя будь-яких металевих пар, оскільки товщина проникнення рентгенівських променів можна порівняти з товщиною активного поверхневого шару. Метод безперервного рентгенографічного дослідження дозволяє простежити за кінетикою структурних перетворень, що мають місце за даних умов експлуатації.

У всіх проведених експериментах зовнішні умови (швидкість ковзання, середовища) були однаковими, змінювалось навантаження [7, 9]. У поверхневому шарі при терті вміст аустеніту при малих навантаженнях збільшувалося, при великих – зменшувався. У процесі тертя встановлювався стабільний вміст аустеніту вище або нижче за вихідний вміст. За цих умов тертя існує критичний питомий тиск, котрим стабільним змістом аустеніту виявляється вихідна його величина. Такому критичному тиску відповідає навантаження 250 МПа. При цьому вміст аустеніту в поверхневому шарі протягом тривалого процесу тертя практично зберігалось постійним.

Формування вторинної структури при терті відбувається в умовах імпульсивного навантаження, швидкої зміни температур в робочих мікрооб'ємах металу [10, 11], також визначається тривалістю знаходження в контакті та перегрівом поверхні – відносно мартенситної точки M_n та критичної області A_c . Автори дослідили цементовану сталь 20Х2НЧА, структур мартенситу та аустенітно-карбідної суміші. Надалі в залежності від температури та швидкостей нагріву та охолодження в процесі тертя відбуваються різні перетворення. При повільному нагріванні виникає гамма перетворень, які відповідають процесам відпуску. При температурі 200–300°C відбувається розпад аустеніту, відпуск мартенситу та продуктів розпаду аустеніту. Підвищення температури приводить до розвитку процесів відпуску. При досягненні температури A_{c1} – A_{c3} починається аустенізація прогрітого шару та розчинення в ньому карбідів. При збільшенні швидкості нагрівання тривалість розпаду аустеніту зменшується.

Граничні значення часу та швидкості нагрівання, необхідні для завершення розпаду аустеніту даної сталі визначають по кривим розпаду аустеніту.

В процесі тертя після виходу з контакту усі зразки покриваються оксидною плівкою при малих навантаженнях плівка тонка та легко знімається навіть при легкому травленні. Зі збільшенням тиску при терті плівка

ущільняється, збільшується її товщина, колір стає коричнево-чорної. Стійкість аустеніту проти окислення вище, чим у продуктів його розпаду. Автори встановили, що підігрів поверхні при терті викликає її окислення, після чого температура поверхні знижується, але метал при цьому прогрівається на велику глибину. Накопичення тепла в поверхневому шарі сприяє розпаду аустеніту.

Так як ферит, мартенсит та карбіди окислюється легше аустеніту, та поверхня додатково окислюється та весь цикл повторюється [5].

В роботі [7] показано, що при різних швидкостях ковзання у міру збільшення кількості циклів контактування, зменшується кількість залишкового аустеніту. Починаючи з деякого моменту для кожного режиму тертя встановлюється стабільний вміст аустеніту.

Процес розпаду аустеніту у вакуумі відбувається інтенсивніше, чим при терті на повітрі. При навантаженні 20 МПа в однакових умовах експерименту повний розпад аустеніту в вакуумі спостерігається при швидкості ковзання 0,6 м/с через 40 хвилин роботи при терті, а при швидкості ковзання 0,9 м/с – на 13 хвилині. При малих швидкостях ковзання та в вакуумі, і в атмосфері існує період, коли розпад аустеніту немає. Цей період в атмосфері триваліший, чим в вакуумі, так як температура поверхневого шару не відразу досягає значення, необхідного для здійснення розпаду. Змінення величини навантаження від 20 до 30 МПа при малих швидкостях ковзання не дуже помітно впливає на хід кривих розпаду. При збільшенні швидкості ковзання вище 0,45 м/с змінення навантаження сильно впливає на зріст кривих розпаду, тут позначається вплив навантаження у створенні високої температури поверхні тертя.

Дослідження, проведені за допомогою методу безперервного рентгенографування, дозволяють встановити інтервал умов тертя, який характеризується зміною процесів зміцнення та розміцнення [5]. Зміцнення

металів і сплавів визначається зусиллям всіх зв'язків між атомами або найслабших зв'язків, лімітують міцність кристалічних тіл.

Велику увагу приділяють дослідженням, пов'язаним з вивченням взаємозв'язку фізико-механічних властивостей та структури матеріалів з їх триботехнічними характеристиками. В результаті вивченні проведених досліджень стало очевидним, що процеси тертя та зносу не можуть бути описані за допомогою існуючих механізмів макродеформації та руйнування [9, 12–15].

Крім того, в цих дослідженнях практично не враховуються явища з релаксаційними властивостями матеріалів трибосистем. Інтенсивність протікання релаксаційних процесів визначає здатність структури матеріалу до збільшення або зниження рівня внутрішніх навантажень, що має істотним образом впливати на зносостійкість [16–18].

Релаксаційні властивості матеріалів, що у контакті, досліджувались також в роботах [7, 18–21]. Експериментально встановлено, що швидкість падіння тиску при впровадженні жорсткої сфери у в'язко-пластичне середовище є ступеневою функцією напруження, що діє в даний момент часу. Недоліком проведення досліджень є те, що в них не враховано вплив швидкості ковзання і температури.

У роботах [22, 23] показано, що зносостійкість і антифрикційність сталі в умовах граничного тертя залежить від її здатності до циклічної релаксації напруги, яка тісно пов'язана з динамічною мікропластичністю.

Автори робіт [24, 25] відмічають, що релаксаційна здатність приповерхневих шарів контактуючих матеріалів визначає такі триботехнічні характеристики, як припрацьовуваність і здатність сполучень що несе. Пропонується оцінку релаксаційної здатності проводити рентгенографічним методом, що дозволяє оцінити характер еволюції дислокаційної структури є динамічним процесом, кількісною характеристикою релаксаційних властивостей поверхневих шарів є внутрішнє тертя.

Не маючи функціонального зв'язку із традиційними механічними характеристиками, внутрішнє тертя є самостійною фізико-механічною характеристикою матеріалу [21, 22].

Однак взаємозв'язок енергетичних параметрів тертя з релаксаційними властивостями матеріалів, зовсім не вивчена.

В даний час нам доцільно вирішити питання вибору матеріалу для досліджуваних деталей, а також методів підвищення їх експлуатаційних характеристик.

1.2 Матеріали для деталей об'ємного гідроприводу

Деталі гідроприводів виготовляють в основному з високолегованих і високоякісних інструментальних, цементованих, азотованих, що відрізняються підвищеною зносостійкістю, малим коефіцієнтом лінійного розширення, мінімальної деформації при термічній обробці та експлуатації [18, 23].

Матеріал золотникових пар повинен зберігати свої першочергові розміри в процесі роботи. Висока твердість робочих поверхонь необхідна для запобігання, впливу твердих включень, що є в робочій рідині. Підбір матеріалу для деталей гідроприводу повинен також враховувати вплив високих робочих тисків, води, великих питомих і контактних навантажень.

Інститутом ВНДГідропривод була проведена робота по підборі матеріалів для кількох груп деталей за типом і стану їх навантаженості, а також по деяким іншим специфічним вимогам. Властивості та призначення цих сталей у відповідності з Держстандартами 5632-92 та 5949-85 наведено в табл. 1.1.

З наведених сталей для високонавантажених деталей обрані для розгляду сталі найбільш високоміцні (зі значенням межі міцності щонайменше 1000 МПа) [21]. Для менш навантажених деталей та деталей зі спеціальними властивостями в роботі [18] пропонуються сталі 30X13, 40X13, 36НХТЮ.

Корозійна стійкість всіх наведених сталей залежить від вмісту вуглецю і від кількості легуючих елементів. Найбільш ефективно підвищують корозійну стійкість сталі, добавки хрому. Хром утворює на поверхні сталі стійку захисну плівку оксидів, яка, незважаючи на незначну величину захищає метал від корозії [22].

Зі збільшенням вмісту вуглецю корозійна стійкість хромистої стали падає [22]. Пояснюють це тим, що корозійна стійкість визначається кількістю хрому у твердому розчині. Вуглець утворює з хромом карбіди, збіднює твердий розчин, що призводить до зниження концентрації хрому в твердому розчині.

Чим вище вміст вуглецю в сталі, тим більше хрому необхідно для збереження корозійної стійкості, та навпаки, корозійна стійкість сталі при постійному вмісті хрому буде тем вище, чим нижче концентрація вуглецю [22].

Таблиця 1.1

Властивості та призначення сталей у відповідності з ГОСТами 5632-92 та 5949-85

Марка сталі	Рекомендовані режими термічної обробки заготовок для виготовлення зразків	σ_B	σ_T	δ_5 , %	ψ , %	КСУ Дж/см ² (кГс·м/ см ²)	Призначення	Примітка
		Н/мм ²	кГс/ мм ²					
		не менше						
1	2	3	4	5	6	7	8	9
14X17H2	I варіант Загартування з 975-1040°C, охолодження в олії, відпустка при 275-350°C, охолодження на повітрі	1080 (Ю)	835 (85)	10	30	49 (5)	Застосовується як корозійностійка високоміцна сталь із досить задовільними технологічними властивостями у хімічній, авіаційній	Найбільшу корозійну стійкість має після гарту з низькою відпусткою. Термін роботи –

	<p>II варіант Загартування з 1000-1030°C, охолодження в олії, відпустка при 620-660°C, охолодження на повітрі</p>						<p>та ін. галузях промисловості; як жаростійка сталь (до 400°C), як жаростійка сталь (до 800°C) – для робочих лопаток, дисків, валів, втулок</p>	<p>тривалий. Рекомендова -на температура застосування – до 400°C</p>
--	---	--	--	--	--	--	--	--

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
25X13H2	*	—	—	—	—	—	Корозійностійка сталь для деталей з підвищеною пластичністю, ударним навантаженням, що піддаються, а також виробів, що піддаються дії слабкоагресивних середовищ (атмосферні опади, водні розчини солей органічних кислот при кімнатній температурі та ін.)	Найбільша корозійностійкість досягається після термічної обробки (загартування з відпусткою) та полірування; має гарну оброблюваність різанням

20X17H2	За згодою	—	—	—	—	—	Корозійностійка високоміцна сталь для важконавантажених деталей, що працюють на стирання та на удар у слабкоагресивних середовищах	Має високу твердість (до НКС 45)
---------	-----------	---	---	---	---	---	--	----------------------------------

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
09X16H4Б	<p>I варіант</p> <p>Нагрівання з 1140-1160°С, витримка 5-5,5 год, охолодження на повітрі, відпустка при 600-620°С, охолодження на повітрі</p> <p>Загартування з 1030-1050° С, охолодження на повітрі або в олії, відпустка при 600-620°С, охолодження на повітрі (дворазово)</p>	980 (1000)	835 (85)	8	45	59 (6)	<p>Застосовується як корозійностійка сталь для високоміцних штампо-зварних конструкцій та деталей, що працюють у контакті з агресивними середовищами</p>	<p>Найбільшу корозійну стійкість має після гарту з низькою відпусткою (до 400°С)</p>

	<p>II варіант</p> <p>1. Нагрівання з 1140-1160°C, витримка 5-5,5 год, охолодження на повітрі, відпустка при 600-620°C, охолодження на повітрі</p>	<p>1180 (120)</p>	<p>930 (95)</p>	<p>8</p>	<p>40</p>	<p>59 (6)</p>	<p>Як жароміцна сталь (до 850°C) для труб пароперегрівачів та трубопроводів – установок надвисокого тиску, листового прокату</p>	<p>Рекомендова-на температура до 650°C. Термін роботи – дуже тривалий</p>
--	---	-----------------------	---------------------	----------	-----------	---------------	--	---

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
09X16H4Б	<p>2. Загартування з 1030-1050°C, охолодження на повітрі або в олії, відпустка при 600-620°C, охолодження на повітрі</p> <p>3. Загартування з 970-980°C, охолодження на повітрі або в олії, відпустка при 300-370°C, охолодження на повітрі</p>	1180 (120)	930 (95)	8	40	59 (6)	<p>Як жароміцна сталь (до 850°C) для труб пароперегрівачів та трубопроводів – установок надвисокого тиску, листового прокату</p>	<p>Рекомендова-на температура до 650°C.</p> <p>Термін роботи – дуже тривалий</p>

30X13H7C2	Загартуванням 1040-1060°C, охладження у воді, відпал при 860-880°C, охладження до 700°C протягом 2 год і потім з піччю, відпал при 660-680°C – 30 хв, охладження на повітрі, загартування	1180 (120)	785 (80)	8	25	20 (2)	Жаростійка сталь (до 950°C), застосовується для клапанів автомобільних моторів	Стійка в сірковмісних середовищах
-----------	--	---------------	-------------	---	----	--------	---	---

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	790-810°C, охолодження в олії							
13X14H3B2ФР	I варіант Загартування з 1040-1060°C, охолодження на повітрі або в олії, відпустка при 640-680°C, охолодження на повітрі	930 (95)	735 (75)	14	55	88 (9)	Жаростійка сталь (до 750°C) для високонанта-жених деталей – дисків, валів, стяжних болтів, лопаток та ін. деталей, що працюють в умовах підвищеної вологості	Рекомендо- вана темпе- ратура засто- сування до 550°C, тер- мін роботи – тривалий
	II варіант Загартування з 1040-1060°C, охолодження на повітрі або в олії, відпустка при 540-580°C, охолодження	ІЗО (115)	885 (90)	12	50	69 (7)		

	на повітрі							
07X16H6	Загартування з 975-1000°C, охолодження у воді, на повітрі або в маслі, подальша обробка холодом при – 70°C, витримка 2 год або	1080 (110)	880 (90)	12	50	69 (7)	Високоміцна сталь для виробів, що працюють в атмосферних умовах, оцтовокислих та інших сольових	Підвищена міцність досягається застосуванням відпустки при

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
	при – 50, витримка 4 год, старіння при 350-400°C, витримка 1 год, охолодження на повітрі						середовищах та для пружних елементів. Не має дельта – фериту	температура х 750°C та 850°C
95X18	Загартування з 1000-1050°C, охолодження в олії, відпустка при 200-300°C, охолодження на повітрі або в олії	Твер- дість – не менш є 55 НЕС	Шарикопід- шипникова сталь високої твердості, застосову- ється також для деталей, що піддаються сильному зносу	Застосо- ву- ється після гарту з низько ю відпуст- кою				

30X13	Загартування з 950-1050°C, охолодження в олії, відпустка при 200-300°C, охолодження на повітрі або в олії	Твердість – не менше 48 ІКС	Сталь для різального, мірного та хірургічного інструменту, пружин та ін. деталей та виробів	Застосовується після гарту та низької відпустки зі шліфованою та полірованою поверхнею, має
-------	---	-----------------------------	---	---

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
								підвищену твердість. Рекомендована температура застосування – до 400-450°C
40X13	Загартування з 1000-1050°C, охолодження в олії, відпустка при 200-300°C, охолодження на повітрі або в олії	Твердість – не менше 50 НКР					Сталь для різального, мірного та хірургічного інструменту, пружин та ін. деталей та виробів	Застосовується після гарту та низької відпустки зі шліфованою та полірованою поверхнею, має підвищену твердість. Рекомендована температура застосування – до 400-450°C

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
13X11H2B2 MP	I варіант Загартування з 1000-1020°C, охолодження на повітрі або в олії, відпустка при 600-710°C, охолодження на повітрі	880 (90)	735 (75)	15	55	88 (9)	Жаростійка сталь (до 750°C) для навантажених деталей – дисків компресорів, лопаток та ін.	Рекомендова -на температура застосування до 600°C, термін роботи – тривалий
	II варіант Загартування з 1000-1020°C, охолодження в олії або на повітрі, відпустка при 540-590°C, охолодження на	1080 (НО)	930 (95)	13	55	88 (9)		

	повітрі							
11X11H2B2 МФ	І варіант Нормалізація з 1000-1020°C, загартування з 1000-1020°C, охолодження в олії або на повітрі, відпустка при 540-	980 (Ю0)	835 (85)	10	50	59 (6)	Жаростійка сталь (до 750°C) для навантажених деталей – дисків компресорів, лопаток та ін.	Рекомендова -на температура застосування до 600°C, термін роботи – тривалий

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
11X11H2B2 МФ	590°C, охолодження на повітрі						Жаростійка сталь (до 750°C) для навантажених деталей – дисків компресорів, лопаток та ін.	Рекомендова-на температура застосування до 600°C, термін роботи – тривалий
	II варіант Нормалізація з 1000-1020°C, загартування з 1000-1020°C, охолодження в олії або на повітрі. Відпустка при 640-680°C, охолодження на повітрі	835 (85)	735 (75)	12	55	69 (7)		
16X11H2B2 МФ	I варіант Нормалізація з 1000-1020°C, загартування з	По узгодженню					Жаростійка сталь (до 750°C) для навантажених деталей – дисків	Рекомендова-на температура застосування

	1000-1020°C, охолодження в олії, відпустка при 660-710°C, охолодження на повітрі		компресорів, лопаток та ін.	– до 600°C; Термін роботи – тривалий
--	---	--	--------------------------------	---

Закінчення таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
16X11H2B2 МФ	II варіант Нормалізація з 1000-1020°C, загартування з 900-1020°C, охолодження в олії, відпустка при 550-590°C, охолодження на повітрі	По узгодженню						

Термообробка хромовмісних сталей негативно впливає на корозійну стійкість, особливо для сталей з високим вмістом хрому. Після поліпшення в сталях відбувається інтенсивна дифузія вуглецю за межами зерен та утворення карбідів хрому [23]. Через велику швидкість дифузії вуглецю та малою швидкістю дифузії хрому його вміст за межами зерен зменшується, що призводить до міжкристалічної корозії [25]. Міжкристалічна корозія має особливий вид корозії, коли під впливом агресивного середовища корозійний процес протікає тільки по межах зерен. Внаслідок зв'язку між зернами слабшають і виникають тріщини. Міжкристалічна корозія в початковій стадії викликає зниження пластичності та в'язкості сплаву, а потім його руйнування [24]. Для усунення небажаної міжкристалічної корозії вдаються до додаткового легування при одночасному зниженню вмісту вуглецю в сталі [25].

У табл. 1.2 приведені матеріали, що застосовуються для виготовлення основних деталей гідроприводів [2, 26, 27]. При робочому тиску до 103 н/см^2 застосовують сірий конструкційний чавун СЧ-20 [10]. Для виготовлення золотникових пар на ряді підприємств використовують сталь 45, яка після поліпшення піддається карбонітрації [28]. По показникам зносо- та корозійної стійкості вона не задовольняє запитам підприємств. Перед нами була поставлено завдання вибрати марку сталі, яка перевершує сталь 45 за основними показниками, необхідними для успішної експлуатації досліджуваних деталей, та підібрати покриття, яке підвищить зносостійкість, корозійну стійкість, виключить зміну розмірів.

Враховуючи те, що в процесі опрацювання (процес зміни геометрії поверхонь тертя та фізико-хімічних властивостей поверхневих шарів матеріалу в початковий період тертя, що зазвичай проявляється при постійних зовнішніх умовах у зменшенні сили тертя, температури та інтенсивності зношування) трибосистеми, а також в процесі її подальшої роботи відбувається формування приповерхневих та поверхневих шарів, можна зробити висновок, що відбуватиметься і зміна релаксаційної здатності трибосистеми [29–32]. Знання закономірностей цієї зміни може бути основою вибору сумісних матеріалів в трибосистемі.

Таблиця 1.2

Матеріали та режими роботи пар тертя ковзання об'ємних гідромашин

Тип гідро-машини	Пара тертя	Матеріали контртіл	Характеристика пари тертя			Ra, Мк м	Термообробка/ HRC (HV)
			p	v	p×v		
1	2	3	4	5	6	7	8
НР-1250/200	Поршень – втулка	Сталь 20Х – Бр.АЖ9-4	150	2	300	0,32	Цм/59-62
НАР-63/200	Підп'ятник – похилий диск	Бр.АЖ9-4 Сталь Х12Ф1	17	7	119	0,32	О.3/59-62
	Блок циліндрів – розпод. диск	Бр. ОСН10-2-3 Сталь Х12Ф1	29	10	290	0,16	О.3.
	Блок циліндрів	Бр.АЖ9-4 Сталь 18ХГТ	300	0,3	102	0,32	Цм
РМНА-250/320	Підп'ятник – похилий диск	БрАЖН 10-4-4 Сталь 38Х2МЮА	19	12	220	0,32/0,1 6	Анотація HV900
	Ротор – розпод. Диск	Сталь 38Х2МЮА Бр ОСН 10-2-3	7	17,5	122,5	0,32/0,1 6	Анотація HV900
	Плунжер Ротор	Сталь 382МЮА БрАЖМц11-6,5-1	310	2,1	651	0,32/0,6 3	Анотація HV900
УНА-125/320	Підп'ятник – плунжер	БрАЖН10-4-4 Сталь 18ХГТ	485	0,5	242,5	0,32/0,2 5	Цм/53-57
УНА-450/200	Плунжер – Ротор	Сталь 18ХГТ БрАЖН10-4-4	330	2,5	825	0,25/0,16	Цм/57-63
	Підп'ятник – похилий диск	БрАЖН10-4-4 Сталь 382МЮА	15	12	180	0,32	HV900

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8
МРФ-400/25М1	Поршень – Шатун	Чавун А4В-1 Сталь 18ХГТ	450	0,05	22,5	0,32	Цм/56-62
	Поршень – Гільза	Чавун А4В-1 Сталь 18ХГТ	200	0,45	90	0,63/0,1 6	Цм/56-62
НА 74-90/320	Підп'ятник – Похилий диск	БрАЖ9-4 Сталь Х12Ф1	15	11	165	0,32	О.3/59-62
НА 74-224/90	Підп'ятник – Похилий диск	БрАОСН 10-2-3 Сталь Х12Ф1	15	15	225	0,32	О.3/59-62
НА 32/320	Підп'ятник – Похилий диск	БрАЖ9-4 Сталь ШХ15	15	9	135	0,32	О.3/59-62
Г15-25Р	Ротор – розподіл. диск	БрОФ 10-1 Сталь 20Х	7	9	56	0,16	Цм/58-63
	Барабан – Тягач	Чавун СЧ 32-52 Сталь 18ХВГ	125	1,5	187,5	0,63/0,1 6	О.3/59-63
	Тягач – Кільце підшипн.	Сталь 18ХВГ Сталь ШХ15	34000	0,02	680	0,63	О.3/59-63

Закінчення таблиці 1.2

1	2	3	4	5	6	7	8
НРФ = 25/500	Поршень – втулка	Сталь 40Х Чавун СЧ32-52	127	1,2	152,4	0,32	О.3/45-48
Н-400У	Поршень – Гільза	Сталь 40Х Чавун СЧ32-52	116	1	116	0,32	О.3/45-48
Г12-2	Пластина – Статор	Сталь Р6М5 Сталь ШХ15	7000	6	42000	0,2	О.3/60-64
Г12-3	Пластина – Статор	Сталь Р6М5 Металокераміка Ж420Х3	7000	3	21000	0,1	О.3/60-64

1.3 Методи підвищення зносо- та корозійної стійкості

На практиці підприємств, що займаються виготовленням та ремонтом деталей об'ємного гідроприводу, використовують хіміко-термічну обробку, дифузійне насичення та поверхнєве легування [33–38] для покращення їх робочих характеристик.

Хіміко-термічну обробку проводять з метою підвистити втомну міцність, твердість, опір корозії, зносостійкість. Один із найбільш широко застосовуваних методів хіміко-термічної обробки – цементация. Цементация підлягають сталі з вмістом вуглецю не більше 0,2 %. При використанні твердого карбюратора (насиченого середовища) нагрівання ведуть у печах, при використанні газового карбюратора – у шахтних герметичних печах.

Час процесу визначається складом сталі, необхідної глибини шару (0,15–2,5 мм), способу цементации. Швидкість приросту цементованого шару складає 0,1 мм/ч при глибині шару 1,0 мм і 0,15 мм/г – при меншій глибині [33].

Заключною операцією завжди є відпуск при 160–180°C на протязі 2–3 годин, при якій знімається напруження та підвищується в'язкість матеріалу. Властивості й області використання цементованих сталей наведені в табл. 1.3 [33].

Таблиця 1.3

Області використання цементованих деталей

Марка сталі	HRC	Використання
20X	58 – 62	Плунжери, штифти, дроселя
18XГТ	58 – 62	Гільзи, втулка, шестерні
12ХНЗА	57 – 61	
18ХНВА	57 – 61	Шатуни, шестерні, золотники, клапани
X17H2	60 – 64	

Твердість серцевини HRC28-42.

Твердість цементованого шару знижується при температурі вище 250°C. Практика показує, що азотування більш ефективно, чим цементация. Азотування здійснюють після механічної та термічної обробки в атмосфері дисоціації аміаку NH₃ при нагріві до 500–700°C в герметичних шахтних печах (табл. 1.4) [33]. Твердість азотування шару в 1,5–2 рази вище твердості цементованого шару. Азотований шар має велику корозійну стійкість. Короблення деталей в процесі азотування практично відсутнє.

Відомі літературні дані про поєднання декількох процесів хіміко-термічної обробки. У роботі [33] описується послідовне проведення цементации й азотування хромистих сталей з метою підвищення втомної міцності. У роботі [39] описаний новий спосіб хіміко-термічної обробки сталей, який призводить до утворення в поверхневому шарі нітридів і карбонітридів хрому.

Таблиця 1.4

Області застосування деяких азотованих сталей

Марка сталі	Режим азотування			Результат азотування		Застосування
	T, °C	продовж., години	ступінь дис.	твердість HV	глибина шару, мм	
40ХНМА	500	50	15-30	550	0,45-0,50	гільзи,
2Х13	580	20	25-35	800	0,25-0,27	втулки, золотники, клапани, сідла

<i>Закінчення таблиці 1.4</i>						
38ХМЮА	510	35-55	20-40	950	0,30-0,35 0,50-0,55	шатуни, поршні, вали, сферичні деталі

Процес проводять у 2 етапи: на 1-му етапі здійснюють азотування або карбонітрування поверхневого шару, потім хромування в порошках, серед яких хром, солі хлористого амонію. Хромування проводять за низьких температур (700°C). Шар, що утворюється має гарну адгезію та високу щільність, але низьку зносостійкість.

У роботі [33] описаний метод, який складається з нітроцементації та лазерного борування. Глибина шару зростає в двічі в порівнянні з лазерним боруванням при високій мікротвердості.

У роботах [27, 40, 41] описані процеси дифузійно-поверхневого легування вуглецевих сталей, що включають вакуумно-дифузійне насичення хромом термообробку з нагріванням до $A_{c3} + (30-50^\circ C)$ та охолодження. З метою підвищення експлуатаційної стійкості виробів термообробку проводять багаторазово, нагрівають зі швидкістю 80–120°C/хв, витримують 1,5–2 хв на 1 мм, охолоджують в воді до 200–400°C.

Усі методи хіміко-термічної обробки трудомісткі, відрізняються тривалістю процесів, і результати не завжди виправдовують витрати.

Аналіз досвіду низки машинобудівельних підприємств показує ефективність використання іонно-плазмової технології [35, 42].

Задаючи властивості покриттів шляхом зміни його хімічної будови та складу, можна спрямовано впливати на зносостійкість, корозійну стійкість, формування стабільних характеристик покриття, що сприяє підвищенню довговічності деталей машин і механізмів.

1.4 Висновки та завдання дослідження

З проведеного огляду випливає:

– основними причинами виходу з ладу деталей об'ємних гідроприводів є знос та корозія, причому розвиваються ці процеси у вузлах сполучення,

– огляд теоретичних та експериментальних досліджень показав, що в області сумісності пар тертя деталей, що розглядаються велика роль відводиться матеріалу.

Показано, що в період проробітку головною властивістю є задиристійкість, а в післяпроробітку – зносостійкість. В зв'язку з цим актуально є розкриття механізму цих процесів та вироблення сумісності матеріалів на різних етапах роботи.

– показано, що вплив на поверхню сполучення (ковзання) деталей хіміко-термічною обробкою, дифузійної металізацією, комплексними методами поверхневої обробки можна вирішувати лише приватні завдання.

– вивчення досвіду застосування іонно-плазмової технології дозволяє припустити доцільність її застосування для підвищення терміну експлуатації гідроприводів.

Для вирішення завдання дослідження велися у таких напрямках:

– вибір матеріалу для виготовлення золотників;

- вибір складу плазмового покриття та оптимальних режимів його нанесення;
- дослідження впливу плазмового покриття на зносостійкість, корозійну стійкість обраної сталі;
- розробка покриття спеціального призначення, оптимізація його складу;
- проведення стендових та промислових випробувань.

РОЗДІЛ 2. РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ПЕРІОДИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1 Ідентифікація технологічних процесів

За характером перебігу **технологічні процеси** поділяються на безперервні, періодичні та дискретні [43].

За безперервні технологічні процеси приймаються такі процеси, в яких кінцеві продукти виробляються до тих пір, поки підводиться сировина, енергія, каталізатори, що управляють впливу. До таких процесів можна зарахувати, наприклад, процеси переробки нафти.

Періодичними є такі технологічні процеси, в яких за порівняно невеликий проміжок часу (годинник або дні) виробляється певна, обмежена кількість кінцевого продукту. У цьому протягом відведеного проміжку часу періодичний процес є безперервним. прикладом періодичного процесу може бути технологічний процес плавки металу в доменній печі, виробництво масивних металевих виливків тощо.

Дискретними називаються такі технологічні процеси, у яких кінцевий продукт виробляється за деякий проміжок часу, і цей процес можна зупинити, а також продовжити з будь-якої технологічної операції без зниження заданого рівня якості. При цьому можна навести такі приклади, як процес збирання виробів на конвеєрі (машини, побутова техніка), випробування готових виробів на спеціальних стендах, технології виробництва цукерок тощо.

Більшість технологічних процесів вимагають розбиття їх на взаємозалежні підсистеми. Необхідність управління технологічними процесами диктується такими факторами :

- Підтримка складу та кількості вхідних компонентів на заданому рівні для забезпечення необхідної якості готового продукту;

- безперервна зміна (підстроювання) параметрів технологічного процесу, що пов'язано з постійним зносом знарядь праці та змінним складом сировинних матеріалів;

- пуском та зупинкою деяких складових технологічного процесу, що вимагають виконання специфічних точно синхронізованих операцій та ін.

Методологічний _ основою управління періодичними технологічними процесами є системний підхід , що забезпечує комплексне Рішення задач управління складовими його технологіями. Таке управління, як правило, забезпечується застосуванням системного підходу, де сам періодичний технологічний процес від його початку та до закінчення розглядається як єдине ціле.

Необхідність застосування системного підходу під час управління періодичними технологічними процесами визначається складністю їхньої ідентифікації. Такі технологічні процеси включають відносно велику кількість вхідних та вихідних змінних, частина яких може змінюватися випадковим чи непередбачуваним чином. Наприклад, якість шихти під час отримання коксу змінюється у відносно широкому діапазоні, так як вугілля, що її становить від горизонту до горизонту, змінює свою якість також у широкому діапазоні, ширина якого визначається як місцем видобутку вугілля, так і способом його добування.

Таким чином, нелінійні зв'язки між вхідними параметрами, недостатність апріорної інформації про закономірності перебігу процесів створюють значні труднощі отримання моделей адекватних для прогнозування перебігу цих процесів . Слід зазначити, що реалізація періодичних багатопараметричних технологічних процесів має задово-

льняти кільком часто суперечливим вимогам . до критеріїв їхньої якості (наприклад, твердість-пластичність тощо), які визначаються як якістю цільового продукту, так і технологією його отримання.

, заготовок, керовані змінні, якість інструментів, режими обробки та ін. Система управління якістю цільового продукту, організована за кожної технологічної операції, у разі є оперативної і у реальному масштабі часу.

На наш погляд, для підтвердження парадигми, що викладається в книзі, достатньо навести приклад її застосування. У зв'язку з цим авторами наведено приклад ідентифікації конкретного технологічного періодичного процесу – технології виробництва чавунних сортопрокатних валків. У цьому слід зазначити, більшість періодичних технологічних процесів є багатокритеріальними [43, 44], й у зв'язку виникає необхідність перманентного вибору критерію, оскільки “не можна одночасно їхати усім трамваях відразу”.

Наведене вище ініціює схему можливої ідентифікації періодичних багатопараметричних технологій, представлену на рис. 1.1.

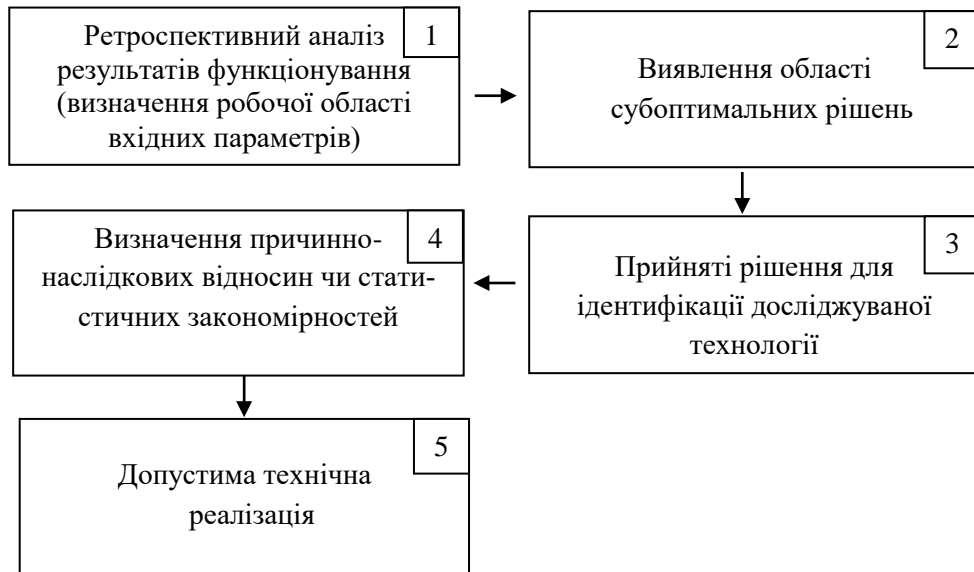


Рис. 1.1. Схема можливої ідентифікації періодичних багатопараметричних технологій

2.2 Передумови, цілі та завдання досліджень

Чорна металургія сьогодні є важливою галуззю народного господарства багатьох країн світу, що мають родовища руди. Конкуренція у багатьох галузях промисловості ініціює випуск високоякісної продукції із заданими властивостями та конкурентно здатними цінovими показниками. При цьому основна частка металопрокату виробляється з чавуну, значна частина якого припадає на багатотоннажні виливки, зокрема прокатні валки. Щоб витримати конкуренцію на світовому ринку готової металопродукції, металургійні підприємства переходять на випуск валків з економнолегованих марок чавуну, що призводить до значного економічного ефекту в промислових масштабах. У зв'язку з розширенням асортименту металопродукції сучасного замовника, що випускається, цікавить, в першу чергу, якість самих прокатних валків, включаючи їх фізико-механічні властивості. Оцінка цих характеристик безпосередньо на об'єкті призводить до великих

матеріально-тимчасових витрат у межах їх масового виробництва і не завжди технічно реалізується, тому що може призвести до порушення цілісності валка. Тому для оцінки якісних характеристик валків останнім часом широко застосовуються неруйнівні методи контролю та математичні методи моделювання.

Незважаючи на те, що за останні десятиліття на виробництві впроваджено безліч методик та моделей оцінки якісних характеристик багатотоннажних металевих виливків (див. напр. [43]), їхня розробка є актуальною. Вивчення наведених робіт показує, що на сьогоднішній день такі методи дають задовільний прогноз властивостей, що частково розходиться з вимогами замовника. Таким чином, ця проблема є однією з основних у сучасному матеріалознавстві, що пов'язано з низкою об'єктивних та суб'єктивних причин, розглянутих у літературному огляді.

У роботі показано, що реалізувати найбільш очевидний, детермінований підхід, що застосовується для оцінки характеристик якості сортопрокатних чавунних валків, зокрема їх механічних властивостей, заснований на аналізі причинно-наслідкових зв'язків і відносин, неможливо. Це пов'язане з тим, що реалізувати найбільш очевидний, детермінований підхід, що застосовується для оцінки механічних властивостей валків, заснований на аналізі причинно-наслідкових зв'язків і відносин, неможливо, оскільки технологія виробництва прокатних валків є наскрізною, що характеризує складний багатопараметричний процес. Тому, на якість валкового чавуну значною мірою впливає велика кількість параметрів технології (хімічного складу, легуючих елементів та модифікаторів, умов охолодження, товщини намазки ливарної форми, способу лиття та ін.), що визначають формування структури та взаємопов'язаних між собою [45]. Навіть незначна зміна параме-

трів технології може призвести до суттєвої зміни механічних та службових властивостей валків у широкому діапазоні. Однак діюча нормативно-технічна галузева документація регламентує тільки рівень твердості прокатних валків, вимоги до міцності, в'язким властивостям і зносостійкості не обумовлені. Існують методи відбору проб для визначення лише твердості, яку передбачає стандарт і забезпечується литою пробкою та пробкою від торця бочки, оскільки вони відрізняються умовами кристалізації. Зважаючи на те, що технологія виробництва прокатних валків є багатопараметричним процесом [48], це також серйозно ускладнює її ідентифікацію. Тому важливим аспектом є забезпечення стабільних показників якості валкового чавуну, насамперед його зносостійкості, без проведення додаткових випробувань та з мінімальними матеріально-тимчасовими витратами.

Імовірно, що одним із можливих варіантів вирішення названої проблеми було б отримання необхідної інформації шляхом проведення натурних випробувань на готовому багатотоннажному об'єкті. Однак це завдання не завжди здійсненне, оскільки її виконання вимагає великих матеріальних та тимчасових витрат, які часто перевершують допустимі межі. Застосування методів неруйнівного контролю якості масивних металевих виливків (магнітного, ультразвукового, теплового, оптичного, радіаційного та ін.) для даної технології мало ефективно, оскільки вони, як правило, ґрунтуються на способах, здебільшого, спрямованих на надійне виявлення небезпечних дефектів, які, як правило, оцінюються експертами у промислових умовах виходячи з їхнього досвіду роботи. Ці оцінки слабо піддаються детермінованому аналізу та формалізації. Вони, як правило, ґрунтуються не на закономірностях, одержуваних внаслідок спеціально проведених експериментів, а здебільшого обґрунтовуються нормативними документами ,

досвідом та статистикою (див. наприклад [47]). Використання класичних методів металографії, при оцінці структури чавуну, за якою можна було б судити про його механічні властивості, наприклад, визначення вмісту в ньому графіту, або карбідів, не завжди дозволяє проводити їх кількісну оцінку з тим ступенем точності, який може бути достатнім для вирішення практичних завдань.

Оперативне отримання необхідної інформації про якісні характеристики чавунних валків, одержуваної в процесі їх виготовлення та експлуатації, утруднюється ще й тим, що цільовий продукт, який являє собою багатотоннажний виріб, одержуваний в результаті його виливки в інтервалі температур $T = 1310 - 1350 \text{ } ^\circ\text{C}$, відбувається тільки після закінчення основного циклу технологічного процесу. Таким чином, тільки після виливки основного виробу та його охолодження, може відбутися завершення основного циклу технологічного процесу, а це трапляється з періодом від кількох годин до кількох діб, залежно від розмірів валка [48]. У зв'язку з цим отримання необхідної інформації можливе тільки після закінчення цього періоду. Усі керуючі впливи, які можуть зробити деяке коригування в технологічний процес, можуть бути зроблені тільки після закінчення основного циклу, отже, вони можуть бути враховані користувачем тільки в наступному циклі, тобто. при виливці наступного виробу. Однак, при цьому, немає гарантії того, що необхідний резерв матеріалів, потрібний при виливці наступного виробу, залишиться тим самим, і можна буде адекватно скоригувати якісні характеристики чавунних та сталевих прокатних валків.

Перелічені недоліки обґрунтовують основні вимоги до пошуку та розробки нових наукових підходів, спрямованих на оцінку якісних характеристик прокатних валків.

Аналіз фундаментальних робіт вітчизняних та зарубіжних вчених за останні 70 років, які започаткували та розвинули у своїх роботах теоретичні та практичні наукові основи формування структури та отримання високоякісних виливків з чавуну: М.Г. Окнова, І.М. Богачова, А.Є. Кривошеєва, К.П. Буніна, Ю.М. Таран-Жовніра, Т.С. Скобло, Л.С. Рудницького, Н.А. Будаг'янця, А. Іноуе, Т. Хасімото та ін. (див., наприклад [47-63]), показав, що одним з виходів, спрямованих на вирішення проблеми оперативної, необхідної для практичних цілей, оцінки якісних характеристик масивних чавунних виливків, зокрема прокатних валків, з мінімальними витратами, є методика, що ґрунтується на створенні математичних моделей прогнозу цих характеристик залежно від хімічного складу виливки, параметрів структури.

З метою отримання прийнятних результатів методика, що розробляється, повинна включати використання як класичних, так і сучасних методів оцінки структури і властивостей виробленого виробу. Так, для встановлення взаємозв'язку між механічними властивостями та елементами структури чавуну валкового планується використання теорії мультифракталів [64]. Запропонована методика є найбільш прийнятною для кількісної оцінки більшості реальних структур, апроксимація яких цілими фігурами Евкліда вносить певну похибку, і тому не завжди прийнятна в практичних завданнях сучасного матеріалознавства. Згідно з запропонованою методикою, кожен неоднорідний об'єкт, яким є структури більшості металів, може характеризуватись спектром статистичних розмірностей Реньї [65]. З спектр розмірностей мультифракталов інтерпретується як деякі фізичні закономірності, які мають окремі статистичні властивості, що роблять можливим їх матеріальне уявлення. Наприклад, у роботах Б. Мандельброта, Ф. Енса,

С.В. Свеснікова, В.С. Іванової, В.І. Большакова, Ю.І. Дуброва, Б.М. Смирнова, І.Ж. Буніна, А.Г. Колмакова, Г.В. Встовського, В.Ф. Терентьєва [66-93] та ін, показано практичне застосування мультифрактального формалізму в описі фізики процесу формування структури різних матеріалів, а також зв'язок фізико-механічних властивостей з розмірними оцінками елементів структури металу. У цьому зв'язку передбачається проведення спеціальних експериментів, аналіз яких дозволяє виробити якісну та кількісну оцінку наступних механічних властивостей чавуну: межі міцності на розрив; межі міцності на вигин; ударної в'язкості та твердості . В результаті аналізу роботи технології виробництва валків та науково-дослідних робіт, спрямованих на вирішення проблеми оцінки механічних властивостей, було сформульовано постановку завдання оперативного прогнозу цих властивостей та визначено основні шляхи її вирішення.

Враховуючи вищевикладене, підвищення характеристик якості прокатних чавунних валків є актуальною та важливою науково-практичною проблемою, яка може бути вирішена шляхом застосування системного підходу, що базується на розробці та впровадженні математичних моделей оцінки критеріїв якості залежно від хімічного складу, параметрів структури . Такий підхід дозволяє не тільки здійснювати прогнозування та коригування показників якості валків у процесі виробництва , а й домагатися їх поліпшення шляхом оптимізації складу, що призведе до підвищення їх експлуатаційних характеристик.

Досліджували сортопрокатні валки виконання СПХН, що містять 2,8...3,5% вуглецю по масі, леговані хромом (0,5...0,8%), нікелем (0,9...1,3%), 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 та механічні властивості промислових валкових чавунів виконань СПХН та СШХН досліджували стандартними методами оптичної мікроскопії та механічних випробувань на стандартизованому обладнанні. Зразки для механічних випробувань та металографічних досліджень вирізали в тангенціальному напрямку з поверхневого шару виливків до чавунних валків.

2.3 Вимоги до показників якості цільового продукту

Валки є основним робочим інструментом у прокатному виробництві, за допомогою якого проводиться деформація металу - обтискання та витяжка злитків та заготовок [94-123]. Ці валки забезпечують підвищення продуктивності прокатних станів, поліпшення якості прокату, зменшення втрат металу як шлюбу, зниження витрати валкового металу.

Прокатні валки різні за виконанням, відрізняються один від одного формою, розмірами в залежності від виду продукції, яку необхідно отримати. Відповідно різні типи сталевих і чавунних валків мають різні фізико-механічні властивості. У валків листових станів бочка гладка, у сортових – на поверхні є відповідні профілю оброблюваного металу струмки, що впливають на неоднорідність розподілу механічних властивостей у робочому шарі .

У свою чергу самі критерії якості валків, зокрема механічні та службові властивості, багато в чому залежать від їхнього хімічного складу, з урахуванням легуючих та модифікуючих елементів, швидко-

сті кристалізації та режимів термообробки [94, 107, 122]. Ці фактори визначають тип та характер структури валкового матеріалу (стали –доевтектоїдна, евтектоїдна, заевтектоїдна або чавуну –білий, сірий або проміжний). Структура є головною характеристикою якості валків, оскільки нею визначаються їх механічні (міцнісні і пластичні), фізичні (температура плавлення , в'язкість , щільність , діелектрична проникність , теплоємність , теплопровідність , електропровідність та ін) і службові властивості, включаючи коефіцієнт тренування , Термо- і зносостійкість та ін [118].

Виходячи з різних умов експлуатації прокатних сталевих та чавунних валків, їх призначення визначається комплексом фізико-механічних властивостей, що використовуються для виготовлення валків, їхнього хімічного складу, технологічних режимів та наступних методів обробки. Якісні характеристики валків значною мірою впливають на такі техніко-економічні показники роботи станів: коефіцієнт використання продуктивності станів і всього допоміжного обладнання, тривалість безперервної роботи станів між перевалками, втрати металу у вигляді шлюбу при налаштуваннях після перевалки валків, якість продукції та відносна витрата валкового матеріалу [100-120].

Термін служби валків визначається відповідністю зносостійкості та міцності валка, профілю прокату та типу стану, температурними факторами нагрівання та охолодження валків у процесі експлуатації, плавністю захоплення металу валками та виключенням пробуксувань, ритмічністю процесу прокатки.

¹Під структурою розуміють окремі пов'язані між собою її елементи (у металах – це зерна, дендрити, пластини, включення та інші характерні складові) [157].

Ряд публікацій, присвячених питанню підвищення міцності і збільшення терміну служби валків, наприклад, Т.С. Скобло та ін [51] показують, що в даний час дослідження проводяться за такими основними напрямками:

- створення нових та модернізація існуючих технологічних процесів;

- оптимізація хімічного складу матеріалів і розробка нових;

- пошук ефективних способів термічної обробки, що підвищують комплекс фізико-механічних властивостей валків;

- вдосконалення умов експлуатації;

- відновлення робочої поверхні металевих бочок прокатних валків;

- розробка та дослідження надійних методів контролю якості та основних оціночних критеріїв.

Підвищення якості властивостей валкового металу досягається за рахунок застосування наступних технологічних операцій: позапечного рафінування, обробки десульфуючими присадками, шлаками, деагації у вакуумі, продуванням інертними газами. Використання цих видів обробки впливає на структуру, що відбивається на зміні співвідношень її складових, кількості, форми та розподілу неметалевих включень, форми графіту. Наприклад, позапічне рафінування особливо ефективно для металу, що піддається пластичній деформації.

До відносно нових і встигли зарекомендувати себе розробок у галузі технології виготовлення прокатних валків слід віднести: метод відцентрового лиття; різні способи виготовлення багат шарових валків, що забезпечують необхідний комплекс властивостей; способи легування та модифікування. Структура валків відцентрового вилівка

характеризується дрібнішими включеннями карбідної фази, які розподілені в матриці рівномірно. Для валкової сталі використання такого методу дозволяє підвищити густину від 7,68 до 7,86 г/см³ і тимчасовий опір розриву від 480 до 637 МПа. Значний вплив на комплекс фізико-механічних властивостей валкового чавуну та сталі надають легуючі та модифікуючі елементи (хром, нікель, молібден, магній та ін.), присутність яких, однак, не гарантує отримання валків з необхідною макро- та мікроструктурою. Найбільш важливими характеристиками прокатних валків є такі властивості: твердість, зносостійкість, в'язкість, міцність, коефіцієнт тертя, термо-і зносостійкість валкового матеріалу.

Виходячи з вищевказаного, до прокатних сталевих та чавунних валків пред'являються такі вимоги:

- 1). Висока твердість та показники міцності робочого шару бочок валків.
- 2). Підвищена термо- та зносостійкість вибіленого шару.
- 3). Ударна в'язкість, що відповідає вимогам замовника.
- 4). Висока захоплююча здатність матеріалу валка (коефіцієнт тертя).
- 5). Мінімальна вартість.

2.4 Існуючі методи оцінки якості цільового продукту

Для дослідження структури металів та сплавів та її впливу на їх властивості широко використовуються традиційні методи макро- та мікроаналізу, рентгенівського, спектрального, термічного, а також дефектоскопії (рентгенівської, магнітної, ультразвукової) [102-106]. Вони мають власний поріг чутливості, найчастіше вузьку спрямова-

ність та застосовуються безпосередньо залежно від призначення об'єкта дослідження (труби, прокатні валки, металоконструкції тощо). Існуючі на сьогоднішній день математичні моделі прогнозу якісних характеристик металевих виробів, засновані тільки на аналізі статистичних даних, дають дуже наближену фізико-хімічну інтерпретацію процесів, що відбуваються при формуванні структури або однозначно враховують вплив хімічного складу та інших параметрів технології. Внаслідок чого результати прогнозу не завжди можуть задовольняти вимогам, що висуваються.

Розглянемо деякі аспекти розвитку класичних методик та моделей оцінки якості металевих виливків, зокрема чавунних та сталевих прокатних валків, теоретичні передумови отримання валків з покращеними властивостями, які можуть бути використані при розробці та дослідженні нових методик оперативної оцінки їх якісних характеристик.

Їх структура характеризується типом металевої матриці, кількістю та складною формою надлишкової фази, але, крім того, вона змінюється за перерізом та довжиною бочки, що визначається впливом хімічного складу валків, тепловим опором ливарної форми та режимом термічної обробки. В силу багатопараметричності технології, врахувати внесок всіх параметрів, що впливають на формування структури та властивостей, неможливо.

Тому встановити взаємозв'язок між структурою матеріалу металевих виливків, зокрема сталевих та чавунних прокатних валків, та якісними характеристиками можна не завжди однозначно і з певною часткою похибки [111].

Для оцінки та прогнозу службових характеристик виливків за допомогою неруйнівних методів контролю широко використовуються

спеціальні структурні діаграми та номограми, що ґрунтуються на аналізі вихідних параметрів технології та забезпечують отримання у готовому виробі заданої структури.

2.5 Передумови розробки методики оперативної оцінки якості цільового продукту

Літературний огляд розглянутих існуючих традиційних і нових методик оцінки фізико-механічних властивостей металевих виливків свідчить про те, що всі вони мають вузьку специфіку використання, враховують вплив на властивості лише окремих параметрів технології, засновані, в основному, на статистичних даних. На сьогоднішній день вони дають задовільний прогноз властивостей, що частково розходиться з вимогами замовника, і застосовувати їх безпосередньо для експрес-оцінки механічних властивостей чавунних і сталевих прокатних валків не доцільно. Поліпшення комплексу механічних властивостей валків за рахунок їх оперативного визначення в процесі виробництва –трудомістке, тривале і дороге завдання, вдосконалення якого, на думку авторів, має йти шляхом створення експрес-методу для їх визначення. Про це свідчить низка фундаментальних робіт з теорії та практики отримання високоякісних виливків.

У зв'язку з цим, передумовою розробки є вивчення нових методик з урахуванням впливу найбільш значущих параметрів, що впливають на формування структури. Очевидно, що параметри сильно взаємопов'язані між собою, і їх частина може змінюватися в широкому діапазоні, що призводить до зміни критеріїв якості. З урахуванням багатокритеріальності та багатопараметричності технології, досліджен-

ня повинні бути засновані на аналізі причинно-наслідкових зв'язків та відносин параметрів, що уможлиблює отримання результатів, що узгоджуються з натурними експериментами. Такий підхід дозволяє здійснювати прогнозування та коригування механічних властивостей прокатних чавунних валків у процесі їхнього виробництва.

У цьому зв'язку, в роботі вивчається можливість застосування теорії мультифракталів [98-112] для кількісної оцінки структури та механічних властивостей металів взагалі і чавуну зокрема. При цьому, реалізувати детермінований метод оцінки механічних властивостей валків, заснований на аналізі параметрів, неможливо, внаслідок багатокритеріальності технології.

Названі причини ініційовані такими умовами:

–неможливість проведення натурних випробувань на готовому виробі, т.к. це призводить до порушення його цілісності;

–через багатопараметричність технології виробництва відсутня можливість реалізації детермінованого методу оцінки механічних властивостей валків;

–труднощі, пов'язані з оперативною інформацією з механічних властивостей через тривалість основного циклу технологічного процесу їх виробництва (від кількох годин до трьох діб);

–умови експлуатації валків² диктують підвищені вимоги від замовника до комплексу службових характеристик;

–розширення сортаменту прокатних сталевих і чавунних валків, що випускаються;

–удосконалення технології виробництва³ валків.

²Різкий нагрів, охолодження та тертя в робочому поверхневому шарі, великі питомі тиску та напруги від вигину та кручення та інші фактори.

До ряду суб'єктивних причин, що диктують створення оперативної методики, належать:

–необхідність наявності дорогого обладнання⁴ для дослідження структури та механічних властивостей на більшості металургійних підприємств через економічні причини;

–вимоги замовника на отримання валків із покращеним комплексом фізико-механічних властивостей, що призводить до додаткових матеріально-тимчасових витрат, необхідних для практичної реалізації цього завдання;

–відсутність нормативних документів на механічні властивості прокатних сталевих та чавунних валків, за винятком допуску на твердість бочки валків;

–розбіжність статистичних даних щодо механічних властивостей валків різних виконань, що пояснюється відсутністю єдиної статистичної бази;

–низький коефіцієнт кореляції формальних рівнянь у розглянутих моделях, які включені до складу методик.

Існуючі на сьогоднішній день моделі та способи оцінки механічних властивостей чавуну роблять прогноз, що практично задовольняє вимоги виробництва.

³Методи відцентрового лиття, різні способи виготовлення багатошарових валків, модернізація способів легування та модифікування.

⁴Електронний мікроскоп, рентгенівська установка, машини для випробування на розрив, удар та ін.

2.6 Обґрунтування методу оперативної оцінки якісних характеристик цільового продукту, що розробляється

У процесі вдосконалення технологічного процесу, як правило, перманентно підвищуються вимоги до якості цільового продукту, що призводить до часткових змін технології його виробництва. Частина цих змін ініційована прагненням розробника до подолання труднощів, пов'язаних із адекватною ідентифікацією показників якості цільового продукту. Наприклад, для періодичних технологічних процесів якість цільового продукту (зокрема якість масивних металевих виливків), як правило, визначається методами натурних випробувань, що здійснюються тільки після завершення основного технологічного циклу, який може відбуватися протягом тривалого часу. У зв'язку з цим, отримання допустимо точної інформації про якість цільового продукту можливе тільки після закінчення основного технологічного циклу, чому адекватні керуючі впливи можуть бути зроблені тільки після його закінчення. При цьому, є ймовірність того, що якість вихідних матеріалів, що витрачаються на виготовлення наступного за номером виробу, наприклад в силу нових їх надходжень, суттєво відрізнятимуться від попередньої якості настільки, що користувач змушений буде постійно, наново, визначати адекватні цим змінам керуючі впливи.

Ця, і аналогічна їй ситуації, ініціюють постановку завдання прогнозування показників якості цільового продукту, одержуваного під час реалізації періодичного технологічного процесу.

Для періодичного технологічного процесу, з урахуванням можливих тимчасових перманентних змін якості вихідного матеріалу, на початок реалізації його основного технологічного циклу, потрібно ро-

зробити метод прогнозування допустимо точних значень показників якості цільового продукту.

У цьому зв'язку розглянемо існуючий в даний час метод прогнозування якості цільового продукту, що отримується при реалізації періодичного технологічного процесу, на прикладі виробництва чавунних валків прокатних [43].

Періодичність процесу виробництва прокатних валків, насамперед, обумовлена часом підготовки форми валка, часом виплавки металу, часом заливання металу у форми, охолодженням валка. Всі ці процеси відбуваються протягом тривалого часу (до 3 ÷ 4 діб, а в деяких випадках і більше), залежно від маси виробу.

Як правило, тільки після закінчення основного технологічного циклу проводиться визначення якості одержаного виробу та перевірка його на відповідність встановленим нормативним документам. Більшість цих способів не забезпечують вирішення поставленого завдання, оскільки вони, крім статистичних методів, реалізуються лише після виконання основного технологічного циклу.

В даний час, при реалізації періодичних технологій та неможливості створення ефективного, детермінованого методу прогнозу якості цільового продукту, часто використовуються статистичні закономірності, створювані на підставі аналізу передісторії роботи об'єкта дослідження за весь час його існування.

У тому випадку, коли прямий експеримент на реальному об'єкті провести неможливо, наприклад, через багатотоннажність технології, поряд зі статистичним прогнозом раціонально використовувати евристичні процедури [50].

На рис. 2.1 наведено схему реалізації запропонованого методу.

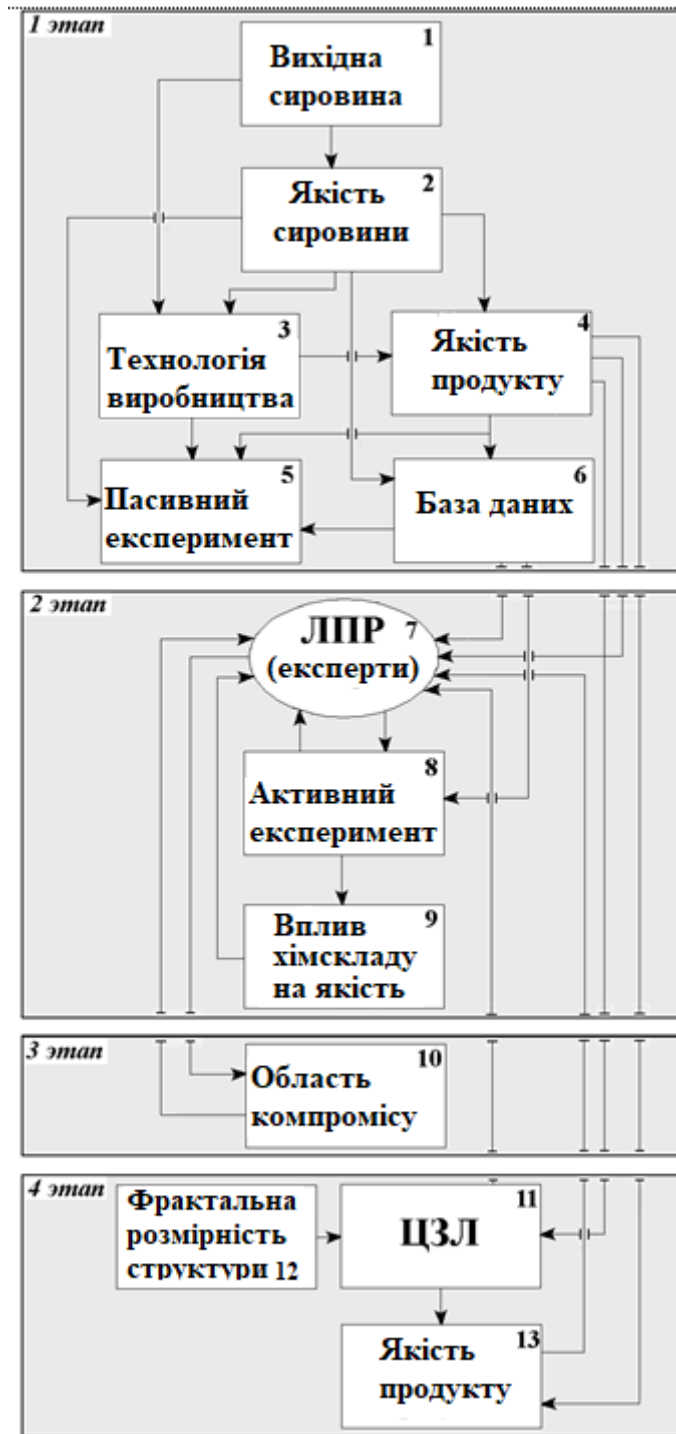


Рис. 2.2. Схема реалізації методу, що розробляється

На *першому етапі* оцінка якості чавунних прокатних валків виконання СПХН та СШХН здійснюється тільки після виконання основного технологічного циклу, з урахуванням якості вихідної сировини,

включаючи якість шихтового матеріалу (рис. 2.1, блоки 1, 2), дотримання всіх технологічних параметрів при їх виливку (рис. 2.1, блок 3). Проведення натурних випробувань на першому етапі (рис. 2.1 блок 4) дозволяє доповнювати БД за механічними властивостями валків і забезпечує достовірну оцінку отриманих результатів, необхідну для контролю подальшого їх прогнозу із застосуванням методів математичної статистики. Тільки після даних операцій проводиться пасивний експеримент (рис. 2.1, блок 5). Пасивний експеримент ґрунтується на репрезентативному обсязі статистичної інформації, що характеризує роботу даної технології протягом тривалого періоду експлуатації (у даному конкретному випадку з 1945 р. до 2014 р.) [64-93]. В результаті його реалізації формуються рівняння у вигляді БД для валків досліджуваних виконань (рис. 2.1 блок 6), що описують якість цільового продукту як функцію хімічного складу вихідного матеріалу і параметрів структури.

Отримані рівняння пасивного експерименту створюються виходячи з аналізу впливу параметрів, що описують робочу область (РО) технології. РВ є всі чисельні значення хімічного складу, елементів структури вихідного продукту, одержувані при цьому показники обраних механічних властивостей. Визначаючи РВ, користувач тим самим призначає допустимі значення змінних, діапазон їх змін і критерії якості цільового продукту. Це, зазвичай, виробляється у процесі виробництва товару і, надалі, служить керівництвом на формування нормативної документації.

Після проведення пасивного експерименту реалізується *другий етап* досліджень. Його проведення ініційовано пошуком шляхів підвищення якості валків, що випускаються. Провівши аналіз технології виробництва валків, було висунуто гіпотеза у тому, що у РВ парамет-

рів технології є такі ЗРО, у яких механічні властивості поліпшуються. Тобто, передбачалося, що можна підібрати такий діапазон чисельних значень вибраних параметрів, в якому поліпшуються механічні властивості. Труднощі визначення раніше невідомої ЗРО, шляхом прямого експерименту, часто полягають у складності або неможливості його реалізації на об'єкті ідентифікації (масивні металеві валки).

Застосування імітаційного, чи іншого методу моделювання з метою оцінки механічних властивостей прокатних валків, з неприйнятною точністю результатів, виключається, оскільки закономірності, сформовані як математичних моделей, потрібні головним чином у тому, щоб прогнозувати результати. Ці дані прогнозу, ймовірно, можуть бути допустимо точними за умови ізоморфізму метрик об'єкта та його математичної моделі, що при моделюванні багатопараметричних технологій практично неможливо.

В даному випадку часто застосовують методи математичного планування експериментів, включаючи використання матриць планування активного експерименту. Активний експеримент, як правило, проводиться у лабораторних умовах, але є варіанти його проведення на виробництві – еволюційне планування. Враховуючи астрономічно велике число n всіх можливих варіантів вибраних змінних - 2^n які неможливо відтворити за допомогою прямих експериментів, т.к. це спричинить величезні матеріально-часові витрати для підприємства-виробника, вирішено провести спеціальний експеримент.

Для вирішення поставленої задачі розроблено модифікацію активного експерименту, яка дозволяє провести експеримент на реальному об'єкті у промислових умовах. Тому, на другому етапі (рис. 2.1, блоки 7-9) пропонується експертам (особам, які тривалий час працювали в галузі експлуатації даної технології, надалі ми їх називаємо

особами, що приймають рішення (ЛПР, рис. 2.1, блок 7)), призначити ту ЗРО, в якій показники якості цільового продукту, на їхню думку, можуть набувати субоптимальних значень. При цьому матриця планування активного експерименту, яка є своєрідною БД, що реалізує задану обмеженнями область значень функції мети (див. рис. 2.1, блок 8), розбивається на три частини.

Перша частина, це рядки матриці планування, у яких допускається проведення прямих експериментів на реальному об'єкті, у разі на чавунних валках.

Друга частина матриці планування –це частина, у якій прямі експерименти проводити неможливо. Реалізація цієї частини матриці базується на даних, одержуваних шляхом евристичних процедур, які, в даному випадку, полягають у тому, що раніше призначені експерти у зазначених рядках матриці планування дають чисельні оцінки показникам якості цільового продукту, які ініційовані рядками цієї матриці. Для достовірності отриманих від ЛПР результатів (рис. 2.1 блок 7) використовуються дані пасивного експерименту (рис. 2.1 блок 6).

Третя частина матриці планування включає рядки, у яких експерти (з якихось причин) не зможуть зробити достовірну оцінку показників якості цільового продукту. У цьому випадку пропонується, для прогнозування результатів, які продиктовані відповідними рядками матриці планування, використовувати існуючі теоретичні передумови та уявлення про досліджувану технологію, які дозволяють зробити необхідний прогноз механічних властивостей сортопрокатних чавунних валків.

В результаті реалізації активного експерименту (рис. 2.1, блок 8) отримані рівняння дозволяють визначати механічні властивості валків зі зміненими (покращеними) показниками.

При цьому коефіцієнти за змінних рівнянь оцінюють вплив кожного змінного на функцію мети (рис. 2.1, блок 9). Крім того, реалізація другого етапу дозволила визначити хімічний склад та співвідношення структурних складових валків із зміненими показниками якості. При реалізації другого етапу може виникнути потреба у коригуванні прогнозованих результатів. У цьому випадку експерти можуть провести повторні дослідження, на що вказують зв'язки між блоками 7, 8 та 9.

До всього слід зазначити, що багато з багатопараметричних технологій спрямовані, наприклад, на реалізацію процесу отримання матеріалу із заздалегідь заданими властивостями. Деякі з цих властивостей за своєю фізичною природою можуть суперечити один одному, наприклад, збільшення міцності чавуну або сталі суперечить збільшенню пластичності та зменшенню крихкості. У зв'язку з цим виникає завдання визначення області, яку надалі називатимемо областю компромісу (ОК) (рис. 2.1, блок 10). У межах ОК суперечності між критеріями перебувають у допустимих для користувача межах.

З приводу реалізації *третього етапу*, спрямованого визначення ОК властивостей матеріалу досліджуваних валків (рис. 2.1, блок 10), слід зазначити, що більшість критеріїв, які характеризують працездатність та ефективність технології, задаються штатною технологією та іншими нормативними документами в допустимих межах. Ймовірно, це продиктовано тим, що розробники нормативних документів прагнуть витримати технологічний процес, наскільки це можливо, у конкретно обраній частині РВ.

На рис. 2.2 наведено приклад визначення ОК для вибраних механічних властивостей робочої зони бочок чавунних валків виконання СПХН (СПХН-41, СПХН-43, СПХН-45, СПХН-49, СПХН-51, СПХН-

60 та СПХН-65). Ця область визначалася графо-аналітичним методом, що полягає у нормованому поданні змінних, величина яких наведена у відсотках [36, 37]. Дані критерії описують РВ механічних властивостей чавунних валків, їх хімічний склад згідно з ТУ У 14-2-1188-97. Оцінка механічних властивостей бочок валків виконання СПХН проводилася за усередненими результатами натурних випробувань зразків, вирізаних у тангенціальному напрямку (вибірка здійснювалася по 320 плавкам загальною масою ~900 тонн) [19, 22, 23, 27, 33, 45, 47.

На графіку рис. 2.2 РО механічних властивостей має такі обмеження: $Y_1 \approx 220 \dots 380$ МПа, $Y_2 \approx 390 \dots 840$ МПа, $Y_3 \approx 8 \dots 25$ кДж/м², $Y_4 \approx 40 \dots 70$ НSD (з урахуванням всього діапазону умов охолодження, що застосовуються в металевій формі) , Де Y_1 - межа міцності на розрив; Y_2 - межа міцності на вигин; Y_3 - ударна в'язкість; Y_4 - твердість по Шору.

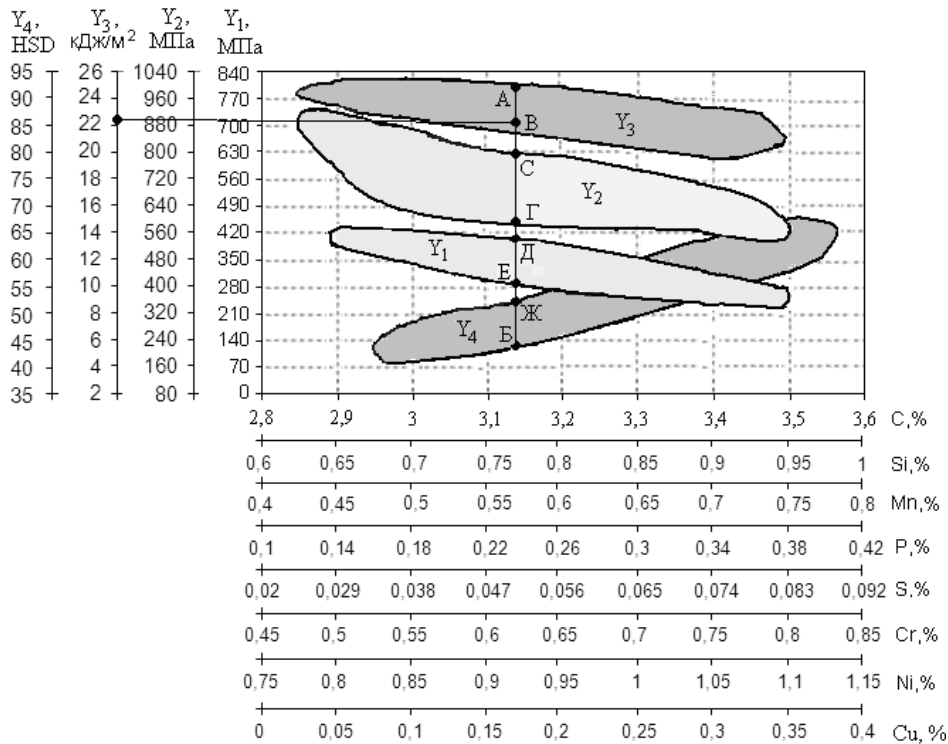


Рис. 2.2. ОК механічних властивостей бочок чавунних валків виконання СПХН залежно від хімічного складу

Графік на рис. 2.2 дає можливість вибору переваги значення конкретного механічного властивості. Якщо є перевага до однієї з властивостей валка, наприклад ударної в'язкості Y_3 (див. положення точки С на рис. 2.2), то провівши вертикаль АБ можна прогнозувати хімічний склад виробу та інтервал існування його механічних властивостей. У даному випадку критерій Y_2 змінюється в межах від 580 до 800 МПа (відрізок СГ); Y_1 – не більше 290...410 МПа (відрізок ДЕ); Y_4 – не більше 43...51 НSD (відрізок ЗБ). Хімісклад валка у своїй визначається з рис. 2.2 і приймає наступні значення: 3,14% С, 0,77% Si, 0,57% Mn, 0,236% P, 0,051% S, 0,62% Cr, 0,92% Ni, 0,17% Cu.

Область існування значень механічних властивостей регулюється наступними параметрами технології: швидкістю відведення тепла при охолодженні валків, що відображається вкладом елементів структури та іншими параметрами технології (спосіб виготовлення – лиття у піщану форму, металеве, відцентрове лиття) тощо.

Таким чином, у постановці завдання прогнозування якості цільового продукту (прокатних валків) враховуються умови існування ОК, правильніше назвати цю область, областю субкомпромісу, оскільки вона, ця область, може змінюватись в залежності від змін, які зазнають вимог до критеріїв. ОК –це область, у якій критерії, визначальні працездатність і ефективність конкретної технології, найкраще поєднуються друг з одним тому, що можливі протиріччя з-поміж них припустимо мінімальні, “протиленності взаємодіють між собою лише серед компромісу”.

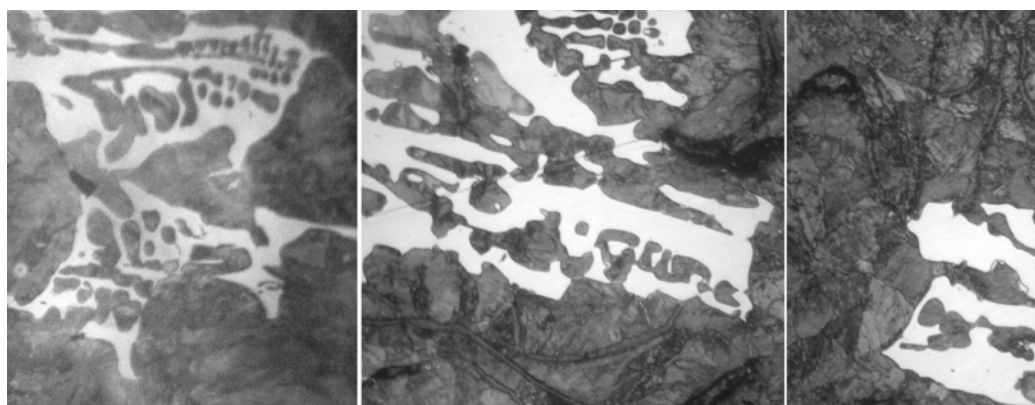
На *четвертому етапі* (рис. 2.2, блоки 11, 12) пропонується проводити оцінку елементів структури валкового чавуну, і стали з застосуванням мови теорії мультифракталів. Цей вибір обумовлений тим,

що апроксимація елементів структури зі складною геометричною конфігурацією їх форми, якщо вона виробляється цілими фігурами Евкліда, то це вносить певну похибку при оцінці характеристик якості матеріалу на підставі аналізу елементів його структури при різних масштабних рівнях.

Це ініціює заміну геометричних характеристик елементів структури (довжина, площа, обсяг) на більш диференційовану розмірну оцінку, що, передбачається, має частково компенсувати неповноту існуючої формальної аксіоматики застосовуваної при ідентифікації структури. Для часткової компенсації неповноти формальної аксіоматики пропонується застосовувати мову вищого рівня [64] – мову фрактальної геометрії.

Доцільність застосування фрактальної геометрії розглянемо з прикладу визначення структури бочок трьох валків виконання СПХН-49 (рис. 2.3). Як це видно з малюнка, структура, що розглядаються ділянок валків *a*, *б*, не відрізняється між собою за складом (перліт + карбід + пластинчастий графіт), але різна за геометричною формою елементів. Результати проведеного металографічного аналізу для цементиту згідно з ГОСТом 3443-87, ідентичні всім трьом валків: Ц15 →Цп6000.

Фрактальна розмірність цементиту ледебуритної евтектики, обчислена клітинним методом [93], валка 1 становить 1,857; для валка 2 – 1,972 та для валка 3 – 1,768.



a

Валок 1

б

Валок 2

в

Валок 3

Рис. 2.3. Структура бочок валків виконання СПХН-49 у литому стані на відстані 20 мм від поверхні: колонії ледебуриту, графітної евтектики, перлітна матриця (*a* , *б* , *в*), травлення $\text{HNO}_3 \times 500$

У табл. 2.1 показники твердості валків, обчислені за площею згідно з Евклідовою геометрією, відсутні, т.к. вони не чутливі до геометричних характеристик цементиту, представлених у Держстандарті 4387.

Таблиця 2.1

Результати проведених обчислень та випробувань

п/п	Характеристика	Валок 1	Валок 2	Валок 3
1	Твердість, визначена шляхом натурних випробувань	52 HSD	54 HSD	51 HSD
2	Твердість, обчислена з урахуванням фрактальної розмірності цементиту	51 HSD	54 HSD	49 HSD

Відповідно до Держстандарту 3443-87 площа, зайнята цементитом становить 15% і площа найбільших його включень (6000 мкм^2) однакові всім трьох валків. Тому твердість не може бути визначена із

застосуванням даних показників. У цьому випадку похибка при оцінці твердості за геометричними розмірами, що визначаються за допомогою евклідової геометрії, знаходиться за межами чутливості прямих випробувань згідно з Держстандарту 3443-87. Як впливає з табл. 2.1 показники твердості, обчислені за допомогою натурних випробувань і аналітично, за допомогою фрактальної розмірності, незначно відрізняються (відносна похибка становить $\sim 4\%$). Цей факт свідчить про те, що фрактальна розмірність елементів структури може виступати в ролі індикатора твердості робочої зони бочок прокатних валків виконання СПХН.

З метою мінімальних витрат та ефективності проведення запланованих досліджень реалізація четвертого етапу проводиться у центральній заводській лабораторії (ЦЗЛ, рис. 2.2, блок 11) з прив'язкою до промислових умов. Спільно з металографічним аналізом структури валків паралельно проводиться мультифрактальний аналіз її елементів (рис. 2.2, блок 12) при одних і тих же масштабах її збільшення за допомогою розробленої для цього спеціалізованої програми "Мультифрактал". Попередній аналіз розмірних оцінок елементів структури досліджуваного валкового чавуну (пластинчастого та кулястого графіту, цементиту, ледебуриту) у масштабному діапазоні від $\times 200$ до $\times 1000$ показав, що ці оцінки змінювалися в межах похибки досвіду, що не перевищує $5 \div 7\%$. Це підкреслює фрактальну природу структури металу (самоподібність), і свідчить про достовірність чисельних значень розмірних оцінок елементів структури прокатних валків, що у свою чергу робить раціональним їх подальше використання при прогнозі якісних характеристик, зокрема механічних властивостей. З економічної точки зору такий підхід доцільно також застосову-

вати за недостатньої оснащеності заводських лабораторій металографічними мікроскопами з високою роздільною здатністю (електронні та растрові електронні мікроскопи). Отримані у своїй статистичні розмірності елементів структури валкового матеріалу можна використувати при прогнозі його механічних характеристик (рис. 2.1, блок 13).

Реалізація четвертого етапу дає можливість коригування результатів прогнозу механічних властивостей досліджуваних валків.

2.7 Вибір змінних та обґрунтування критеріїв якості

Визначення повного комплексу фізико-механічних властивостей з прикладу прокатних валків – $Y_i (i = 1, \dots, n)$, що формуються при виробництві цих виробів, є одним із актуальних завдань сучасного матеріалознавства [44]. Приймаємо, що кожному властивості, з безлічі відомих властивостей, відповідає певний критерій $Y_{i,r}^* (r = 1, \dots, s) \in Y_i$, яким оцінюється ту чи іншу якість прокатного валка, і навіть технологічність чи економічність його виробництва. Приймаємо, що існує безліч якісно неоднорідних критеріїв – $Y_i^* (i = 1, \dots, n)$, що включають підмножина $\{Y_{i,r}^* (r = 1, \dots, s)\}$ якісно однорідних критеріїв⁵. Як правило, величина критерію трактується як оцінка ступеня досягнення тієї чи іншої мети. Користувач, визначаючи РВ технології, призначає граничні значення керованих змінних $X_k (k = 1, \dots, m)$ та ті критерії якості

⁵Наприклад, критерії Y_i можуть виступати як безлічі показників механічних властивостей металу, таких як, міцність $Y_{1,1}^*$, твердість $Y_{1,2}^*$ і т.д., а Y_j – як безліч економічних показників, наприклад, прибуток $Y_{2,1}^*$, собівартість $Y_{2,2}^*$ і т.д.

$Y_i (i = 1, \dots, n)$, які він визначив як основні під час реалізації цієї технології.

Природно, що вибір критеріїв якості та змінних технології виробництва прокатних валків повинен базуватися на детальному аналізі роботи цієї технології та фундаментальних дослідженнях. Як показано у багатьох роботах відомих вітчизняних дослідників-практиків А.Є. Кривошеєва, Н.А. Будаг'янця, Т.С. Скобло та інших [93-123], найбільш значущими параметрами, що впливають на властивості чавуну валкового і сталі, є їх хімічний склад і структура. Їх вибір обумовлений тим, що хімічний склад валкового матеріалу формується на підставі складу шихтових матеріалів, брухту, різноманітних шкідливих домішок, присадок і добавок окремих легуючих елементів, модифікаторів. Структура чавунних і сталевих прокатних валків на різних масштабних рівнях, яка служить індикатором багатьох характеристик їх якості, див. технологічних операцій (умов охолодження валків, способу виливки, термічної обробки та ін) на якісні характеристики.

На рис. 2.4 наведено результати вибору змінних X (елементів хімічного складу та параметрів структури) та механічних властивостей для чавунних сортопрокатних валків із структурою пластинчастого графіту. Як видно з наведеної схеми, число керованих змінних обрано 11, а кількість обраних експертами критеріїв якості – 4 [36, 37].

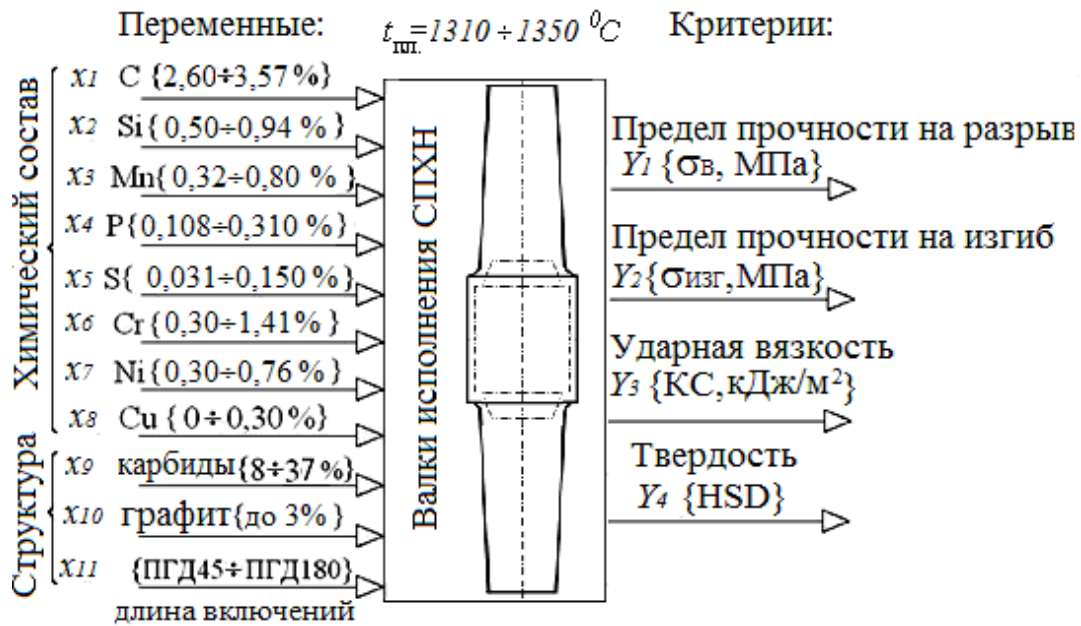


Рис. 2.4. Принципова схема багатопараметричної технології виробництва прокатних валків

Прийнята експертами (орієнтовний ступінь впливу елементів хімічного складу та параметрів структури на механічні властивості валкового чавуну в РВ та за її межами, визначалася на підставі аналізу передісторії роботи даної технології та тих теоретичних положень, які викладені в наступних літературних джерелах [94-123].

2.8 Хімічний склад та структура

Як матеріал для даного дослідження було прийнято чотири литі прокатні чавунні валки виконання СПХН (СПХН-43, СПХН-45 (після двох плавок), СПХН-49) та СШХН (СШХН-50 після трьох плавок) виробництва ПАТ ДЗПВ (м. Дніпропетровськ). Сортопрокатні (С) чавунні валки з пластинчастою формою графіту (П) та кулястою фор-

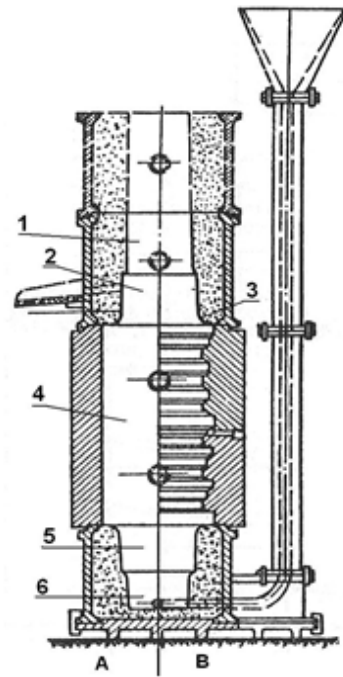
мою графіту (Ш) легують хромом (Х) та нікелем (Н) для підвищення їх службових характеристик, зокрема твердості та зносостійкості.

На ПАТ ДЗПВ чавунні валки всіх видів відливають у комбіновану форму –кокіль, в якій відбувається прискорена кристалізація робочого шару бочки валка, та опок з відформованими в них шийками, тріфами та прибутковою частиною. Стаціонарні комбіновані ливарні форми призначені для виливки чавунних валків масою від 100 кг до 20 тонн із необхідною твердістю робочого шару бочок та задовільними механічними властивостями приводних елементів.

Складання форм для виливки досліджуваних валків здійснювали у спеціальній ливарній ямі, поверхню якої футерують вогнетривкою цеглою (рис. 2.5 а). Валки відливали вертикально, з тангенціальною установкою живильника у нижній частині форми (рис. 2.5 б). Такий спосіб за двома живильника забезпечує отримання чистої поверхні валка. У процесі обертання дедалі легші частки (шлак, неметалеві включення) і гази переміщуються до центру валка і виносяться у прибуток. Сифонна установка живильника за всіх своїх переваг має загальний недолік, який полягає в тому, що після заливання металу найбільш гаряча частина валка знаходиться внизу, що порушує спрямоване затвердіння металу –знизу вгору. [47, 54]. Форми кокілів для відливання заготовок валків були гладкими. Розміри та конфігурація кокілів визначаються розмірами та конфігурацією валків. При проектуванні кокілів необхідно враховувати величину усадки заготівлі валків та припуск на їхню обробку. Товщини стін кокілів для дрібних і середніх валків намагаються зберегти в межах 120...180 мм і для великих - 180...260 мм. Як показав багаторічний досвід, при більш тонких стінках кокілі досить швидко розтріскуються і стають непридатними.



a



б

Рис. 2.5. *a* – зовнішній вигляд ливарної форми для виливки чавунних валків виробництва ПАТ ДЗПВ; *б* – кокіль з гладкою внутрішньою поверхнею (А); кокіль з каліброваною внутрішньою поверхнею (В). 1 – верхній трейф; 2 – верхня шийка; 3 – гантель; 4 – бочка; 5 – нижня шийка; 6 – нижній трейф

Для відливання валків з перліто-графітною та перліто-цементито-графітною структурою робочого шару, залежно від їх призначення, внутрішню поверхню кокілів покривають в одних випадках шаром ливарної фарби завтовшки 0,75...3,00 мм, а в інших випадках шаром намазки – товщиною 6...12 мм. Стосовно кокілів з гладкою внутрішньою поверхнею, товщина кокілів і товщина шару фарби або намазки також дуже впливають на якість валків, особливо на розподіл властивостей по перерізу. Велике значення має товщина шару фарби або намазки при виготовленні непрофільованих

валків з перліто-цементито-графітною структурою з чавуну легового. Застосування товстого шару намазки кокілів сприяє значній зональній ліквідації вуглецю, фосфору, сірки, а також неметалевих включень. Це підвищує крихкість валків, що призводить до утворення тріщин та поломок. У зв'язку з цим у виробництві валків даного типу важливо узгоджувати товщину шару теплоізоляційної намазки кокіля з умовами експлуатації валків, а також з розподілом структурних складових та твердості металу за їх перерізом [47]. Заливання рідкого металу проводилося в інтервалі температур $1310 \div 1350$ °С після очищення шлаку та відбору проби для маркувального хімічного аналізу. Для лиття кокілів масою до 12 тонн використовувалися розплави вагранкової плавки, а для лиття кокілів понад 12 тонн – розплави пічної плавки. Тривалість охолодження кокілів у формі така: при масі валка до 3 тонн – 12 год; при масі 3...6 тонн – 24 год; при масі 6...10 тонн – 40 год; при масі 10...13 тонн – 60 год і за масі понад 13 тонн – 72 год. Вибивання кокілів валків виконання СПХН проводилося після охолодження до $250 \dots 300$ °С, а кокілів валків СШХН – після охолодження до $100 \dots 150$ °С.

Технологічні параметри отримання валків наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1

Параметри литих заготовок чавунних сортопрокатних валків,
що випускаються ливарним цехом ПАТ ДЗПВ

Технологія виготовлення валків				Параметри бочок валків			
№ плавки	Піч ІЛТ-6, ІЛТ-20	Лиття в кокіль	Температура заливки чавуну, °С	Товщина намазування форми, мм	Діаметр, мм	Довжина, мм	маса, кг
1-173	СПХН-43		1310÷1350	4÷12	520	1000	1600
2-134	СПХН-49				940	1200	6450
1-233	СПХН-45				1000	1900	9500
2-130	СПХН-45				920	1900	8200
1-120	СШХН-50				376	600	500
3-203	СШХН-50				350	500	362
2-33	СШХН-50				400	600	568

Склад та структура литих сортопрокатних чавунних валків є основними факторами, що визначають їх фізико-механічні властивості. Досліджували чавунні валки виконання СПХН, що містять 2,8...3,5% вуглецю за масою, леговані хромом (0,5...0,8%), нікелем (0,9...1,3%), 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%) (табл. 2.2).

Хімічний склад валків встановлювався у суворій відповідності до необхідної структури та їх службового призначення, та регламентувався нормативними вимогами ТУ У 27.5-24608640-002:2008 «Валки прокатні чавунні».

У табл. 2.3 подано основні характеристики валків.

Таблиця 2.2

Хімічний склад досліджуваних сортопрокатних валків виконань СПХН та СШХН, % за масою

3	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu-СПХН; Mg-СШХН
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
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
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
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
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
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
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

Таблиця 2.3

Основна номенклатура валків для виробництва дрібносортного, середньосортного та великосортного прокату

Маркування чавуну	Гвердість робочого шару, HSD	Структура робітника шару валків	Чорнова вага валка, кг	Розміри бочок валків, мм	Призначення валків	Виконання валків
2	3	4	5	6	7	
СПХН-43	43-53	Легований хромом і нікелем перлітний чавун із пластинчастим графітом та серендієм вмістом карбідів.	3255	520 × 1000	Валки чорнових клітей дротяних дрібно-, середньосортних та трубпрокатних станів.	СПХН-43
СПХН-49	49-59		12080	940 × 1200	Валки чистових клітей великосортних, рельсомолочних та безперервнозаготівельних станів	СПХН-45 СПХН-45
СПХН-45	45-55		15100	920 × 1900	Валки передчистових клітей великосортних, рельсомолочних та безперервнозаготівельних станів	СПХН-50 СПХН-50 СПХН-50
			16730	1000 × 1900	заготівельних станів	СПХН-50

Закінчення таблиці 3.3

1	2	3	4	5	6	7	Плавка № ва- лка
№13217, №13218, №13191 від 05.09.11 р.	СШХН-50	50-62	Легований хро- мом і нікелем пе- рлітний чавун із кулястим графі- том та середнім вмістом карбідів	1660	376 × 700	Валки чорнових, передчистових та обтискних клітей сортопрокатних станів	1-173
3-203				1000	350 × 500		№14093 від 18.10.11 р.
№13247, №13248, №13185, №13186 від 02.08.11 р.	СШХН-50	50-62		1000	350 × 500		2-134
№13281, №13282, №13194, №13195 від	СШХН-50	50-62		1100	326 × 600		№11212 від 26.02.11 р.
				1145	400 × 600		№11208 від 24.02.11 р.
				1145	400 × 600		1-233
				1110	326 × 600		№11218 від

Досліджувалися сортопрокатні валки з гладкими бочками (рис. 2.6).



Рис. 2.6. Чавунні валки виробництва ПАО ДЗПВ (м. Дніпро)

Для підвищення якості валкового металу використовувалися такі модифікатори : - Foundrisil для валків виконання СПХН; Elmag - 600, Elmag -900, VI 57 (M), Varinos , Elgraf - для валків виконання СПХН . Модифікатор типу Foundrisil , основу яких складає феросиліцій, що містить оптимальну кількість кальцію та барію, призначений для забезпечення ефективного контролю за рівнем відбілу в сірому та високоміцному чавунах. Його застосування особливо ефективно при обробці сірого чавуну з низьким вмістом сірки, коли використання інших модифікаторів є малоефективним. Сфероїдизуючі модифікатори Elmag -600, Elmag -900, VI 57 (M), Varinos , Elgra призначені для отримання виливків із високоміцного чавуну та модифікування сталі.

Для дослідження впливу хімічного складу та параметрів структури обраних валкового чавуну на його механічні властивості використовувалися такі методи досліджень: металографічний, з використанням оптичного мікроскопа Neophot -2; натурні випробування –визначення механічних властивостей; мультифрактальний аналіз структур-

них складових; методи планування та моделювання, експертні оцінки, описані в наступних розділах.

Як зразки для структурного аналізу та натурних випробувань були відібрані сколи робочої зони металевих бочок валків та зразки-свідки. Після шліфування зразків на абразивному папері дисперсністю від 200 до 1200 мкм та полірування на папері з нанесеним шаром алмазної пасти дисперсністю від 25 до 3 мкм проводили травлення шліфів у 4% розчині азотної кислоти в етиловому спирті (4 см³ HNO₃ та 96 см³ спирту). Шліфування зразків здійснювали при водному охолодженні для запобігання структурним змінам поверхневих шарів металу внаслідок його нагрівання.

На рис. 2.7 –рис. 2.9 наведено структуру бочок валків.

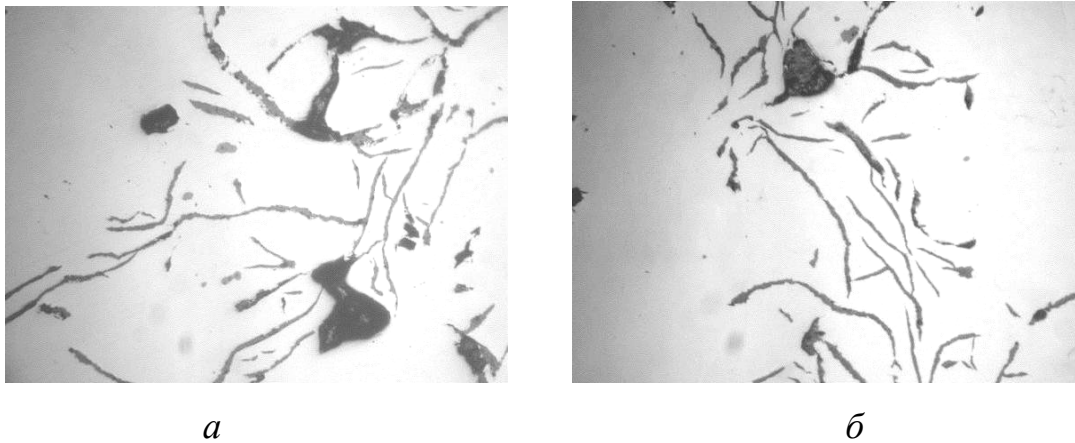
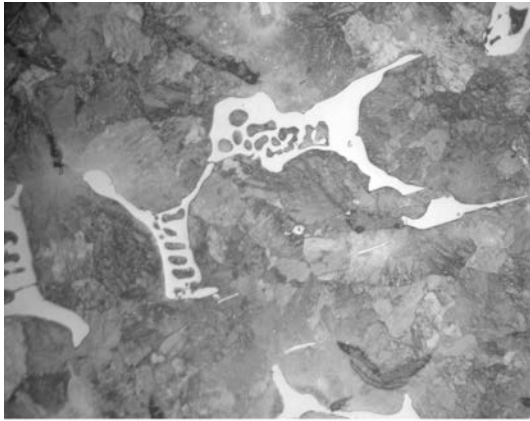


Рис. 2.7. Мікроструктура бочок валків виконання СПХН-45 (*а*) та СПХН-49 (*б*) на відстані 10 мм від поверхні в литому стані: форма графітних включень, не травлено, $\times 200$



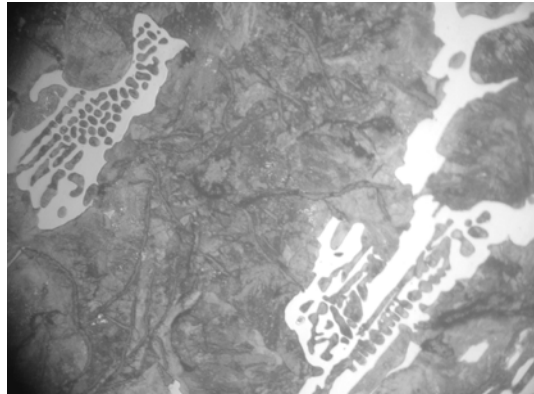
a



б

Рис. 2.8. Мікроструктура бочок валків виконання СПХН-45 (*a*) та СПХН-49 (*б*) на відстані 10 мм від поверхні в литому стані: форма графітних включень, травлення HNO_3 , $\times 200$

У робочій зоні бочок валків виконання СПХН кількість карбідів у вигляді цементиту ледебуритної евтектики змінювалося від 8 до 37%; що відповідає еталону Ц25. Зміст пластинчастого графіту, який слід одночасно розглядати як структурну складову та неметалічне включення, змінювалося ~від 0 до 3%, що відповідає балу ПГ2, з довжиною пластин, що оцінюються балами ПГД45÷ПГД180 згідно з Держстандартом 3443. Аналіз мікроструктури дозволив зафіксувати зміну форми графітних включень вузьких межах – ПГФ1 , ПГФ2 ; розподілу включень графіту– ПГр1 , ПГр2. Площа, займана пластинчастим перлітом, становила 60-85%, що відповідає стандартам П70 і П85 відповідно.



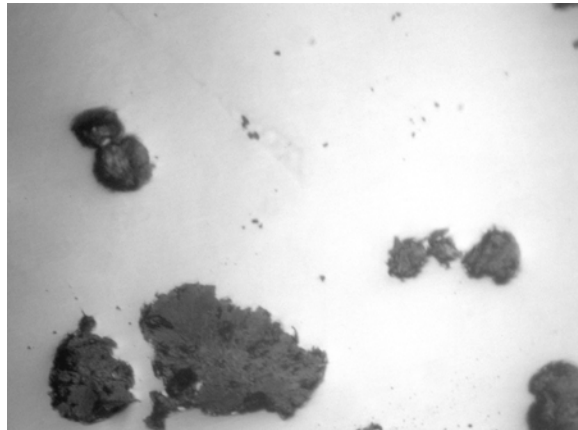
a



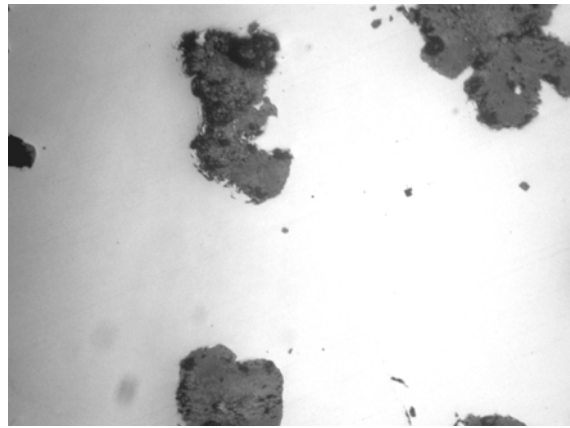
б

Рис. 2.9. Структура бочок чавунних валків виконання СПХН-43 у литому стані на відстані 30 мм від поверхні: колонії ледебуриту, графітної евтектики, перлітна матриця (*a*); форма графітних включень (*б*); *a* - травлення HNO_3 *б* - не травлено \times , 200

Для валків виконання СШХН розміри включень кулястого графіту (їх діаметр) на поверхні шліфу змінювалися від 35 до 59 мкм, що за даним ГОСТом відповідає еталону ШГд45 або балу 6 ISO 945-75 (рис. 2.10). Кулястий графіт у робочому шарі бочки (ШГф5 за формою) на глибині $\sim 5 \div 15$ мм зустрічається значно рідше за карбіди, включаючи ледебурит, що пояснюється його вмістом \sim до 3% (еталон ШГ4). Куляста форма графіту викликана присадкою невеликої кількості магнію - до 0,054% за масою.



a



б

Рис. 2.10. Мікроструктура робочої зони валкового чавуну виконання СШХН-50 на відстані 40 мм від поверхні: включення кулястого графіту (*a, б*), $\times 400$ без травлення (плавка 1-120)

Перліт має різну дисперсність ПД (середня відстань між двома сусідніми пластинами цементиту): від 0,79 мкм (ПД0,5 за еталоном) до 2,2 мкм (ПД1,6), яка визначалася зі збільшенням структури $\times 1000$. Площа, займана перлітом, становить 60-70%, що відповідає стандарту П70.

На рис. 2.11 наведено мікроструктуру валкового чавуну з кулястою формою графіту після травлення HNO_3 (плавка 3-203 і плавка 2-33).

Площа, займана цементитом, для алків виконання СШХН-50 після трьох плавок, становила загалом 20-30% за підрахунками з допомогою лінійного методу А. Розиваля відповідає балової оцінці Ц25.

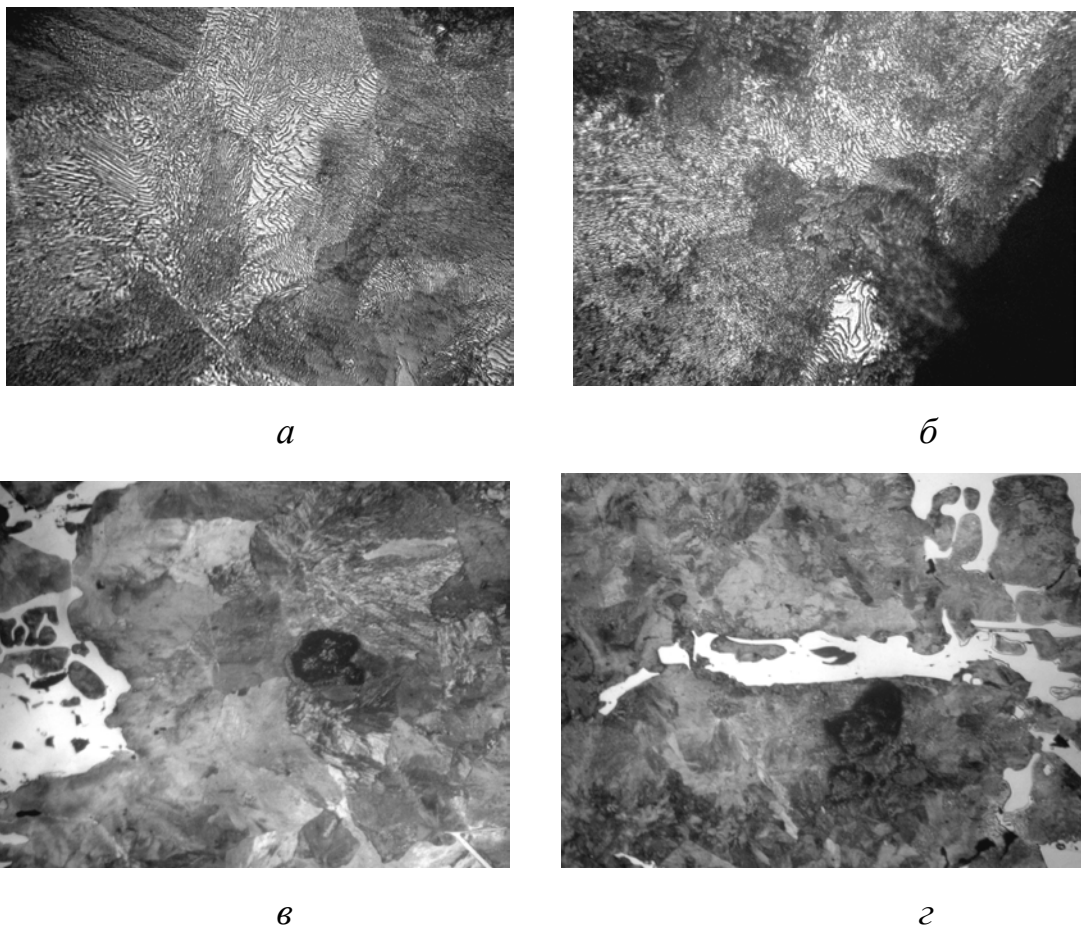


Рис. 2.11. Мікроструктура робочої зони валків виконання СШХН-50 на відстані 40 мм від поверхні: перлітна матриця (а, б), $\times 800$; колонія ледебуриту (в, г), $\times 300$ після а, б - плавки 3-203 ;
в, г плавки 2-33

2.9 Результати експериментів та їх аналіз

Матеріал валків майже не піддається механічним випробуванням на міцність. При випробуванні чавунних валків обмежуються вимірюванням твердості на поверхні бочки згідно з ТУ У 14-2-1188, а механічна міцність сталевих валків оцінюється за результатами випробувань лише проб, що відливаються окремо або у вигляді припливів до валків. Такі випробування не дають достатньо повного уявлення про механічну міцність матеріалу власне валків. Як зазначалося вище, механічна міцність одного й того самого матеріалу, зокрема чавунного валка, різна за його перерізом, тому точного судження про міцність валка окремою пробою скласти не можна. Крім цього, істотний вплив на результати випробувань надає напрямок зусилля, що викликає руйнування, по відношенню до напрямку стовпчастих кристалів у структуру валка [46-52].

Для отримання задовільних даних про механічну міцність валкового матеріалу доцільно випробовувати проби, що вирізуються з різних місць тіла валка в радіальному a , і тангенційному напрямках. Такі проби можна вирізати з валків у процесі їх первинної механічної обробки та подальшого калібрування. За умовами відбору цих проб, доцільно прийняти для випробування механічної міцності зразки невеликого розміру. Опір вигину та ударна в'язкість визначаються на зразках $10 \times 10 \times 6$ мм, опір розриву – на зразках діаметром 6 мм при розрахунковій довжині 36 мм.

Однією з основних показників валків є твердість робочого шару, регламентована технічними умовами постачання валків. Твердість визначають на поверхні бочки та у глибині робочого шару. Для випробування твердості та перевірки мікроструктури на глибину робочого

шару бочку відливали на 50 мм довше заданого розміру. З цього припуску при обробці валків на верстаті відрізалися кільця, від яких відбиралися темплети для лабораторних випробувань. З метою усунення нерівностей і рисок випробувана поверхня піддається шліфуванню.

Механічні властивості валкового сортопрокатного чавуну визначали на стандартному сертифікованому обладнанні з використанням сучасних методів та вимірювальної апаратури: випробувальна машина «INSTRON», маятниковий копер ПСВ 5, випробувальна машина ЦД-40, твердомір – склероскоп Шора. З литих проб було відібрано заготовлі, з яких виготовлялися зразки для натурних випробувань. Зразки вирізалися з робочої зони гладких металевих бочок валків у тангенціальному напрямку, а також виготовлялися з окремо відлитих проб у виливках –зразків-свідків. Механічні властивості валкового чавуну визначалися згідно з Держстандартом 27208-87 “Виливки з чавуну. Методи механічних випробувань. Ударну в'язкість чавуну визначали без надрізу на зразках розміром 101055 ×мм ×. Для оцінки рівня міцності при згинанні були використані зразки 10 ×10 ×90 мм, а при випробуваннях на розтяг –зразки діаметром 25 мм, при розрахунковій довжині 50 мм. Нижче, у табл. 3.4 наведені механічні властивості досліджуваних валків.

Таблиця 3.4

Механічні властивості прокатних валків виконань СПХН та СШХН

№ п/п	№ плавки	Виконання валка	σ_B , МПа	$\sigma_{ізг}$, МПа	КС, кДж/ м ²	HSD
1	2	3	4	5	6	7
1	1-173	СПХН-43	330	670	14	45
3	2-134	СПХН-49	320	440	15	51

Закінчення таблиці 3.4						
2	1-233	СПХН-45	370	480	17	46
4	2-130	СПХН-45	420	600	19	47
5	1-120	СШХН-50	410	720	20	51
6	3-203	СШХН-50	390	630	23	54
7	2-33	СШХН-50	400	700	21	56

2.10 Висновки та завдання дослідження

З проведеного в даному розділі огляду випливає:

- основними причинами виходу з ладу деталей об'ємних гідроприводів є знос та корозія, причому розвиваються ці процеси у вузлах сполучення,

- огляд теоретичних та експериментальних досліджень показав, що в області сумісності пар тертя деталей, що розглядаються велика роль відводиться матеріалу.

Показано, що в період проробітку головною властивістю є задиристійкість, а в післяпроробітку – зносостійкість. В зв'язку з цим актуально є розкриття механізму цих процесів та вироблення сумісності матеріалів на різних етапах роботи.

- показано, що вплив на поверхню сполучення (ковзання) деталей хіміко-термічною обробкою, дифузійної металізацією, комплексними методами поверхневої обробки можна вирішувати лише приватні завдання.

- вивчення досвіду застосування іонно-плазмової технології дозволяє припустити доцільність її застосування для підвищення терміну експлуатації гідроприводів.

Для вирішення завдання дослідження велися у таких напрямках:

- вибір матеріалу для виготовлення золотників;
- вибір складу плазмового покриття та оптимальних режимів його нанесення;
- дослідження впливу плазмового покриття на зносостійкість, корозійну стійкість обраної сталі;
- розробка покриття спеціального призначення, оптимізація його складу;
- проведення стендових та промислових випробувань.

РОЗДІЛ 3.
ВПЛИВ ПЛАЗМЕНИХ ПОКРИТІВ
НА РОБОЧІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДЕТАЛЕЙ
ОБ'ЄМНИХ ГІДРОПРИВОДІВ

Досвід роботи інструментального виробництва та деяких галузей машинобудування показав перспективність застосування іонно-плазмових покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей машин та інструментів [57]. Розвиток технології нанесення плазмових покриттів значно випереджає розуміння причини підвищення їхньої працездатності [58].

В даний час не встановлено зв'язок між властивостями покриттів, що наносяться, і робочими характеристиками деталей машин і інструментів, на які вони наносяться, не існує правил вибору оптимальних технологічних параметрів нанесення покриття для отримання тих чи інших властивостей. Застосування іонно-плазмового методу у конкретних умовах виробництва потребує вибору технологічних режимів його нанесення та оптимізації його параметрів [59].

3.1 Вибір складу плазмового покриття

При виборі плазмових покриттів та технології їх нанесення аналізуються насамперед властивості тугоплавких сполук, зі зіставлення яких можна дійти невтішного висновку, що нітрид титану (табл. 4.1) [57]:

– має високі властивості міцності (мікротвердість, модуль пружності) у широкому інтервалі температур;

- низьку теплопровідність;
- стійкий високотемпературної корозії та окислення;
- коефіцієнт термічного розширення ($9,35 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹) близький за значенням до коефіцієнта термічного розширення сталі, що використовується як підкладка, що важливо для гарної адгезії;
- титан і азот не належать до гостродефіцитних матеріалів і широко використовуються в промисловості.

Беручи до уваги вищевикладене, як матеріал покриття обраний нітрид титану.

Таблиця 3.1

Властивості тугоплавких з'єднань, використовуваних в якості покриття

Характеристики з'єднань	Ti-N	TiC	ZrN	Mo ₂ N	CrN
Вміст азоту, вуглецю, мас, %	22,63	20,05	13,2	–	–
Тип решітки	ГЦК	ГЦК	ГЦК	Куб	–
Період решітки, нМ	4,249	4,324	4,567	4,167	–
Густина, кг/м ³	5430	4930	7090	–	–
Температура плавлення, °С	–	–	–	Розкладається при 600°С	Розкладається при 1500°С
Модуль пружності, $\times 10^7$ Н/м	25600	46000	–	–	–
Мікротвердість, МПа	20500	31700	29500	–	10800
Коефіцієнт температурного розширення, 1/град $\cdot 10^6$	9,35	7,95	7,24	4,5	2,3

3.2 Вибір оптимальних технологічних параметрів осадження плазмових покриттів

Як оптимальні параметри нанесення плазмових покриттів на робочі поверхні деталей у даній роботі варіювалися: величина негативного потенціалу, який подається на виріб, при іонному бомбардуванні; температура розігріву виробів; тиск реакційного газу, що подається в камеру та час осадження покриття. Перший етап нанесення покриттів – іонне очищення. Вона проводиться для отримання атомно чистої від забруднень поверхні виробу безпосередньо перед осадженням покриття шляхом бомбардування поверхні прискореними іонами матеріалу, що випаровується. При цьому на виріб подається негативний потенціал, що прискорює іони, які, бомбардуючи поверхню, повністю розпорошують нейтральні атоми, що осаджуються, а також частково і атоми поверхневого шару, виробляючи якісну очищення поверхні.

Одночасно прискорені іони впроваджуються в поверхневий шар, насичують його і тим самим створюють передумови хорошої адгезії покриття з основою. Під час іонної очистки відбувається розігрів деталей. Контроль температури обов'язковий, щоб уникнути відпустки. Діяльність він здійснювався оптичним параметром. Регулювання температури здійснюється періодичним включенням та вимкненням електродугового випарника. На деталі при іонному бомбардуванні подавався негативний потенціал 1000. Відповідно до технічних даних [43, 44] установки «Булат-3Т» температура підкладки може змінюватися від 300 до 800°C. Іонне бомбардування, виконане при температурі підкладки 500°C, виготовленої зі сталі 38Х2МФЮА, відповідає найкращій адгезії покриття та найбільш високій зносостій-

кості (табл. 3.2). При нижчих температурах спостерігається зниження адгезії, що призводить в процесі експлуатації до відшаровування покриття і, як наслідок, до задирів, зниження зносостійкості. Ці явища спостерігаються і в тому числі, коли температура розігріву поверхні, що напилюється, перевищує температуру відпустки сталі через розміщення останньої.

Після закінчення іонної очистки потенціал, що подається на виріб, знижується до 150–250 В і в камеру подається дозована кількість азоту. При цьому енергія іонів стає недостатньою для розпилення. Відбувається формування покриття, що представляє собою з'єднання випаруваного матеріалу з азотом, що надходить в камеру. В роботі для отримання нітридтитанових покриттів у випарнику встановили електрод з титану ВТ1-00 (ГОСТ 19807-94), а як газореагент використовували азот газоподібний марки ОСЧ (ГОСТ 9293-94). Кількість газу, що подається в камеру, регулюється нашковувачем і фіксується зниження вакууму, що реєструється вакуумметром.

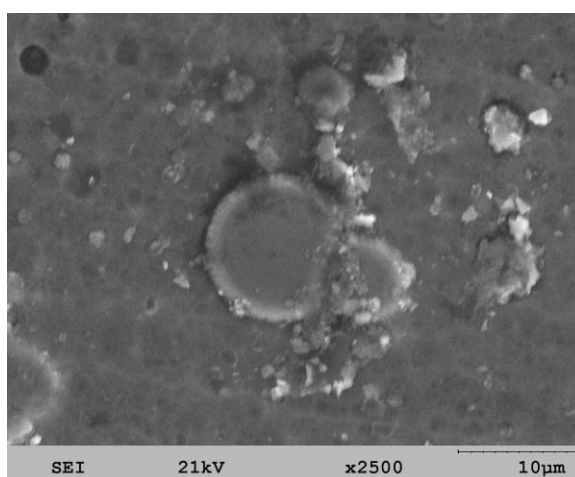
Таблиця 3.2

Вплив температури іонного бомбардування титаном на адгезію покриття з підкладкою та зносостійкість при експлуатації

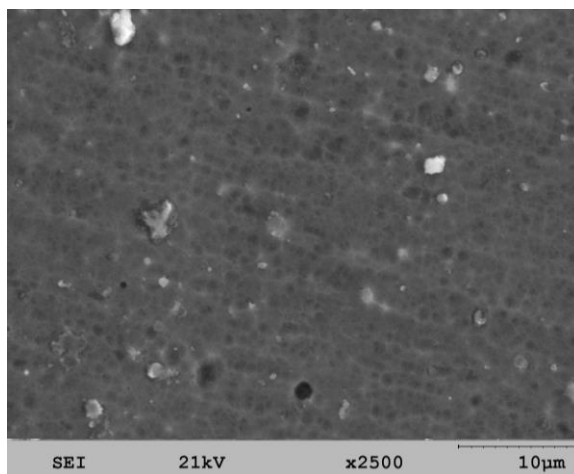
Марка сталі	Адгезія K_{α} (в числівнику) та зносостійкість (в знаменнику) при температурах, °С				
	без покриття	300	400	500	700
38Х2МЮА	$\frac{-}{3 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,60}{2,8 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,75}{2,5 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{1}{2,0 \cdot 10^{-4}}$	$\frac{0,50}{2,3 \cdot 10^{-4}}$

Подача газу підтримується постійною протягом циклу наплення. Оптимальний тиск азоту має визначатися у кожному конкретному випадку та залежить від складу катода, моделі вакуумно-плазмової установки, на якій наноситься покриття [45, 49]. Для визначення оптимального значення тиску азоту, що забезпечує одержання на робочих поверхнях якісного покриття, нітрид титану наносився при різних парціальних тисках азоту – від $5 \cdot 10^{-3}$ Па до 1 Па.

Цей діапазон тисків був вибраний на підставі літературних даних щодо ефективності роботи виробу з плазмовим покриттям [45, 49]. Покриття, отримані при різних лещатах азоту, відрізняються кількістю та розміром крапельної фази та кольором. Найбільша кількість крапельної фази спостерігається у покриттів, отриманих при тиску азоту $3 \cdot 10^{-2}$ Па. Вони мають сірий та жовтувато-сірий колір. Зі збільшенням тиску азоту до 1 Па покриття набувають золотисто-жовтий колір з незначною кількістю краплинної фази без слідів лушення та відшаровування.



a



б

а – $3 \cdot 10^{-2}$ Па; б – 1 Па

Рисунок 3.1 – Мікроструктура поверхонь покриттів нітриду титану, отриманих при різному парціальному тиску азоту

Таблиця 3.3

Вплив парціального тиску азоту на характеристики покриття нітриду титана

Тиск азоту, Па	$3 \cdot 10^{-3}$ Па	$3 \cdot 10^{-2}$ Па	1 Па
Мікротвердість, ГПа	23,0	25,0	20,0
Колір покриття	сірий	жовто-сірий	золотисто-жовтий

При тисках азоту $3 \cdot 10^{-3}$ Па, $3 \cdot 10^{-2}$ Па підвищується мікротвердість покриття.

Рентгенографічні дослідження показали збільшення ширини дифракційних максимумів β (333), що свідчить про мікростворення кристалічної решітки хімічних з'єднань, які входять в склад покриття [60]. Можна припустити, що це явище пояснюється використанням атомів азоту, діаметр яких більше діаметра сфери, вписаної в грати

титану. Велика твердість та високий рівень мікрспотворень призводить до зростання крихкості покриття. При збільшенні тиску до 1 Па мікротвердість зменшується до 20 гПа. Із зменшенням рівня мікрспотворень кристалічних ґрат у покритті, зростає його пластичність. Знижується крихкість покриття при досить високій його твердості. Експерименти показали, що покриття нітриду титану, отримане при тиску 1 Па азоту, ефективно підвищує зносостійкість деталей, виготовлених зі сталі 38Х2МЮА.

Дуже важливим параметром є товщина покриття, що наноситься. Це пояснюється тим, що при великих товщинах покриття виходять крихкими і набувають схильності до утворення тріщин та відшаровування.

Товщина покриття, що наноситься пропорційна струму дугового розряду та часу осадження. При струмі дуги, що дорівнює 80 А, швидкість зростання покриття нітриду титану становить 10–12 мкм/год [59]. Нами досліджувалися покриття завтовшки від 2 до 7 мікрон, нанесені на сталь 38Х2МФЮА.

Результати досліджень показали, що найбільша адгезійна активність до підкладки та вплив на підвищення зносостійкості сталі має покриття нітриду титану товщиною 6 мікрон. При більшій товщині спостерігається відшаровування покриття (рис. 3.2) [61, 62].

Таблиця 3.4

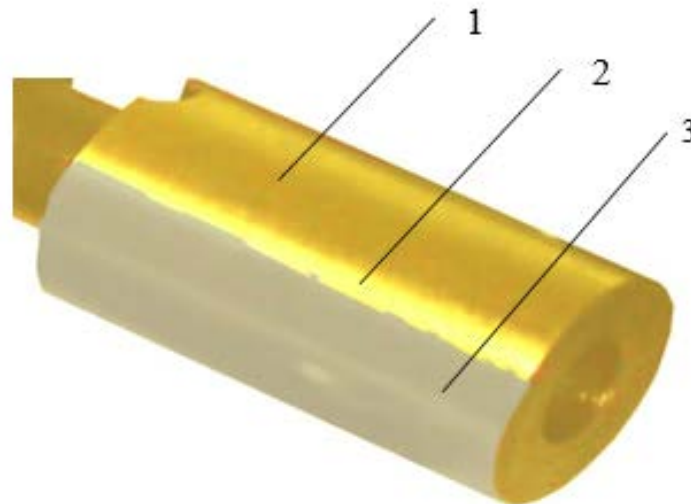
Вплив парціального тиску азоту на зносостійкість деталей з покриттям

Марка сталі	Зносостійкість, $г \cdot 10^{-4}$ при парціальному тиску			
	без покриття	$3 \cdot 10^{-3}$ Па	$3 \cdot 10^{-2}$ Па	1 Па
38Х2МФЮА	3,0	2,8	2,5	2,0

Таблиця 3.5

Вплив товщини нанесеного покриття нітриду титану
на зносостійкість деталей

Марка сталі	Зносостійкість, $\text{г} \cdot 10^{-4}$ при парціальному тиску 1 Па						
	без покриття	Товщина покриття, мкм					
		2	3	4	5	6	7
38Х2МФЮА	3,0	2,9	2,5	2,2	2,0	1,9	2,7



1 – покриття; 2 – границя відшарування; 3 – підкладка

Рисунок 3.2 – Початкова стадія відшарування покриття товщиною
7 мкм

Проведено випробування на корозійну стійкість зразків із сталі 38Х2МФЮА з покриттям нітриду титану та без покриття. Випробування проводили у воді при температурі 20°C протягом 1000 годин. Швидкість корозії спочатку впливу водного середовища (24 години)

висока, хоча помітно, що показник швидкості корозії у зразків з плазмовим покриттям зростає повільніше. Така залежність має місце у перші 24 години. Потім спостерігається значне зниження показника швидкості корозії. Значення показника швидкості корозії стабілізується і згодом лише повільно знижується.

Таким чином, для отримання якісного покриття на деталях об'ємного гідроприводу, виконаних зі сталі 38Х2МЮА, необхідно проводити іонне бомбардування поверхні при напрузі 1000 В при робочому вакуумі $6 \cdot 10^{-3}$ Па. Температура розігріву поверхні деталей не повинна перевищувати 500°C. Наступна конденсація покриття повинна проводитися при парціальному тиску азоту 1 Па. Оптимальна товщина покриття складає 6 мкм. Вибір зазначених параметрів обґрунтований досягненням найкращої адгезії покриття та підкладки, підвищенням зносостійкості, корозійної стійкості.

3.3 Структура та фазовий склад нанесених покриттів

Для виявлення фізичної сутності оптимального покриття необхідно було дослідити його структуру та фазовий склад. На поверхні досліджуваних зразків, виконаних зі сталі 38Х2МЮА, розігрітих при іонному бомбардуванні до температури 500°C, спостерігається значна кількість краплинної фази (рис. 3.4).

Мікрорентгеноспектральним аналізом було встановлено, що це осадження (рис. 3.5).

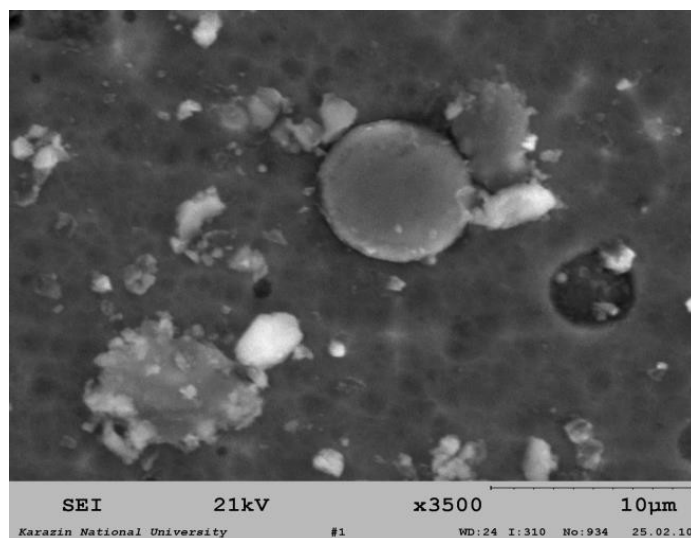


Рисунок 3.4 – Поверхня сталі після бомбардування іонами титану

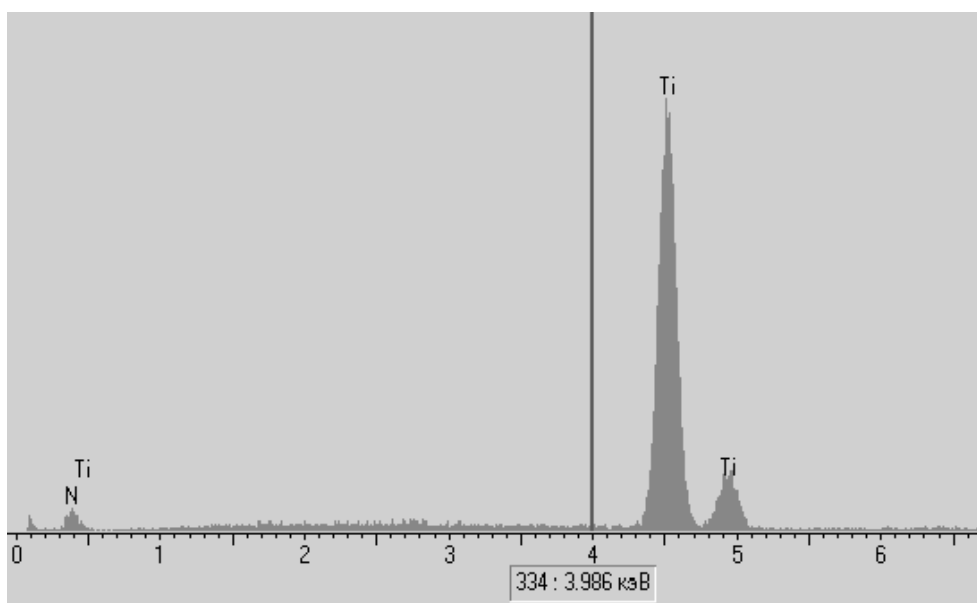


Рисунок 3.5 – Мікророзподілення титану по поверхні після іонного бомбардування

Наявність титану у підкладці не виявлено. Твердість поверхневого шару після іонного бомбардування зростає з 400–450 МПа до 1050–1100 МПа. Наступним етапом після бомбардування є осадження покриття. При зіставленні мікроструктури поверхні сталі після

термообробки та підготовки поверхні до нанесення покриття (рис. 3.6, а) з мікроструктурою цієї ж поверхні після нанесення покриття (рис. 3.6, б) помітно, що покриття нітриду титану, що наноситься, згладжує нерівності, які можуть грати роль концентратів напруги, а також деякі геометричні дефекти.



Рисунок 3.6, а – Зовнішній вигляд золотника з сталі 38X2МЮА після термообробки і шліфування



Рисунок 3.6, б – Зовнішній вигляд золотника із покриттям нітриду титану

Це порівняння дозволяє визначити вимоги щодо підготовки поверхні для нанесення покриття. Підготовлена до нанесення плазмового покриття поверхня повинна бути механічно чистою, не містити сторонніх включень, мати високий клас чистоти поверхні, не містити ніяких дефектів. Проведені мікрорентгеноспектральні дослідження показали, що у покритті містяться титан, азот та вуглець (рис. 3.7). У матриці досліджуваних зразків титан та азот не виявлено. Нанесене покриття не вносить істотної зміни до складу та структури основного металу. Розподіл елементів від поверхні деталі із покриттям, представлений на рис. 3.7 свідчить про те, що вміст титану досягає максимального значення безпосередньо на самій поверхні, потім кількість титану зменшується і другий сплеск (в 2 рази менший, ніж на самій поверхні) спостерігається на глибині ~ 3 мкм, а потім різке зменшення титану.

Це пояснюється тим, що в покритті α -Ti поступово зменшується від підкладки до зовнішньої поверхні покриття, так як при бомбардуванні осаджується на поверхні, а в покритті, що конденсується, спостерігається мінімальна кількість краплинної фази. Щодо вуглецю, то максимальне значення – на глибині ~ 3 мкм. Вміст азоту найбільший на глибині ~ 3 мкм і потім із збільшенням глибини різко зменшується.

Зміст інших елементів, починаючи з 4 мкм, майже однаково. Очевидно, вуглець дифундує з матриці у бік покриття при нагріванні поверхні при іонній бомбардуванні. При цьому досягається висока адгезія покриття до підкладки та низька – до матеріалу, що обробляється, що є однією з основних вимог до покриття для забезпечення високої зносостійкості деталей. Рентгеноструктурні дослідження показали, що в приповерхневому шарі в покритті виявлено

залишкові стискаючі напруги 1800 МПа. Цей факт має велике значення для підвищення зносостійкості. У зв'язку з тим, що відповідальними за руйнування є напруги, що розтягують, наявність стискаючих напруг зміцнює робочу поверхню тим сильніше, чим більше їх величина.

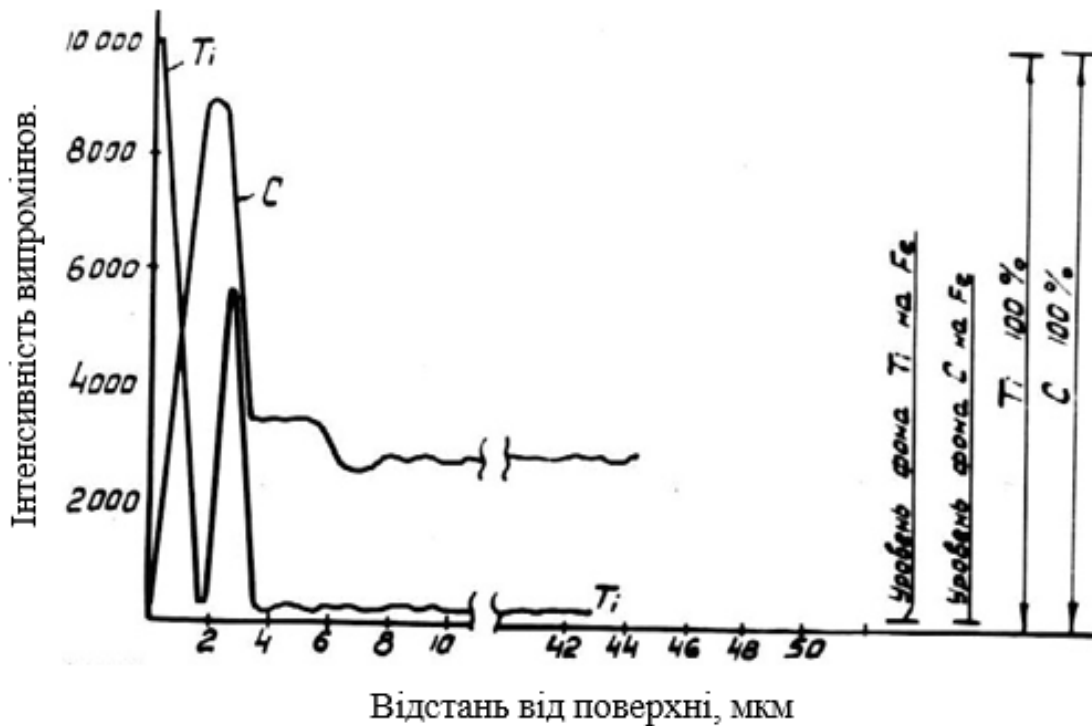


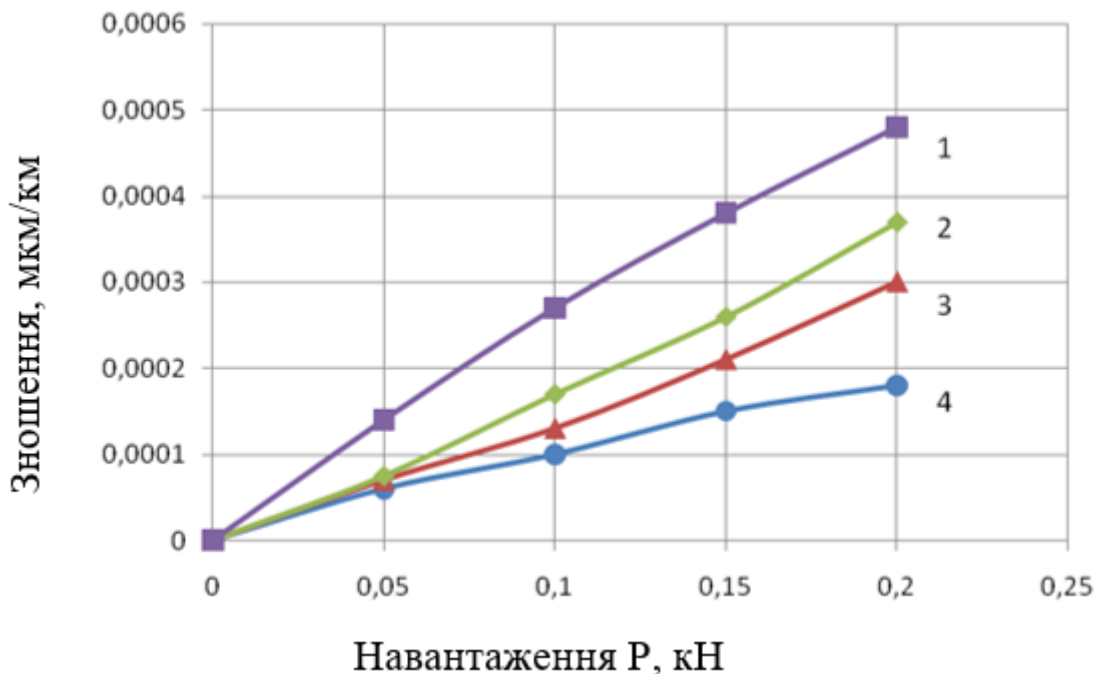
Рисунок 3.7 – Розподіл елементів уздовж покриття, перехідної зони та матриці зразка

Виникнення стискаючих напруг має місце, якщо коефіцієнт теплового розширення основного матеріалу значно менше, ніж покриття. При охолодженні деталі з покриттям діаметр циліндричної деталі буде зменшуватися швидше, ніж діаметр покриття і за рахунок сил зв'язку, що діють між покриттям і поверхнею деталі, покриття стискатиметься, тобто в ньому виникнуть напруги, що стискають. Зі збільшенням товщини покриття сила, необхідна для стиснення

покриття, повинна зростати, а сила зв'язку між поверхнею деталі та покриттям залишається постійною. Тому зі збільшенням товщини покриття при її досягненні критичного значення має відбуватися відшаровування покриття.

3.4 Вплив плазмових покриттів на триботехнічні характеристики досліджуваних матеріалів

Для оцінки доцільності застосування іонно-плазмової технології для деталей об'ємного гідроприводу проведено триботехнічні випробування. Дослідження на зносостійкість виконувались машиною СМЦ-2. Тривалість випробувань становила 10 годин при загальному навантаженні 200 Н.



1, 2 – сталь 38 X2MЮА після азотування;

3, 4 – сталь 38 X2MЮА з покриттям Ti-N

Рисунок 3.8 – Вплив поверхневої обробки на величину зносу

Ролики виготовлялися із сталі 38Х2МЮА. Усього випробовували 10 зразків. П'ять азотували, а на інші наносили плазмове покриття нітриду титану на установці. «Булат 3Т» при однакових технологічних параметрах. Колодочки виконані з графітованого чавуну, хімічний склад якого наведено в табл. 3.6.

Таблиця 3.6

Хімічний склад матеріалу контртіла

№ зразка	Вміст елементів, %							
	C	Mn	Si	P	Cr	Ni	Mo	Cu
1–10	–	0,9-1,0	1,8	0,1-0,12	0,35	0,9-1,0	0,45- 0,55	0,35- 0,4

Результати випробувань на зносостійкість показали, що покриття нітриду титану зменшує зношування сталі 38Х2МЮА більш ніж у 2 рази в порівнянні з азотуванням.

В табл. 3.7 наведені середні результати зносних випробувань всіх досліджуваних матеріалів.

Таблиця 3.7

Результати зносних випробувань

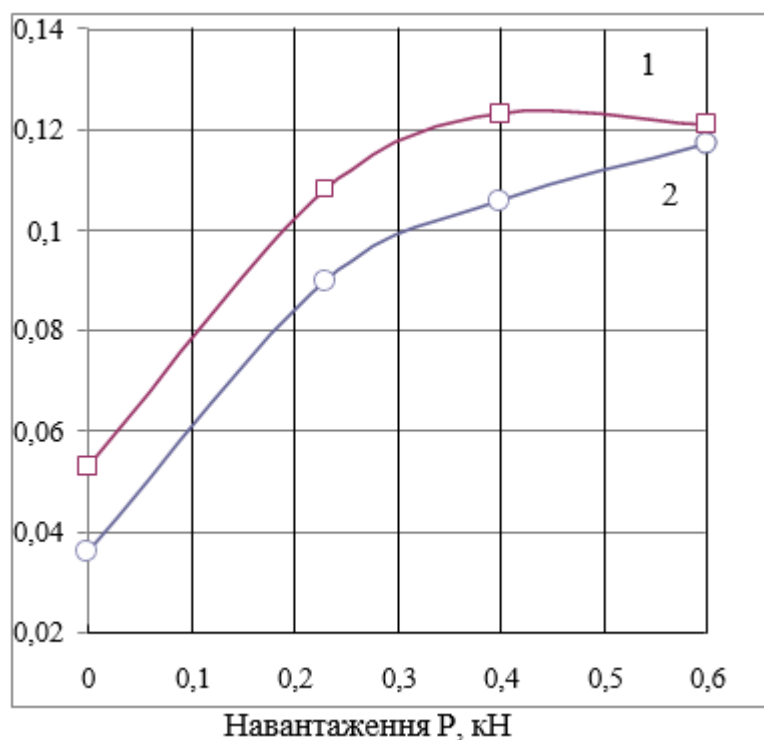
Матеріал диску	Матеріал колодки	Знос ролика, $г \cdot 10^{-4}$, (середній по трьох випробувань)	Знос колодки, $г \cdot 10^{-4}$, (середній по трьох випробувань)
сталь 45	СЧ20	46,0	26

<i>Закінчення таблиці 3.7</i>			
сталь 45 с карбонітрацією	СЧ20	40,0	18
сталь 38Х2МЮА	СЧ20	25,0	15
сталь 38Х2МЮА з азотуванням	СЧ20	19	12
сталь 38Х2МЮА з покриттям ТІ-Н	СЧ20	9	6

За результатами випробувань на зносостійкість можна зробити висновок, що покриття нітриду титану сприяє підвищенню зносостійкості в порівнянні з азотованою сталлю (на 48 %), а також зниження зносу матеріалу, що сполучається з сірого чавуну (на 27 %) в досліджених умовах ковзання.

3.5 Визначення коефіцієнтів тертя

Коефіцієнти тертя показують стійкість деталі з плазмовим покриттям до задиротворення. Розраховувалися коефіцієнти тертя з урахуванням діаграми моменту тертя. На рис. 3.9 показано залежність коефіцієнтів тертя від навантаження.



1 – зразок сталі 38X2МЮА без покриття Ti–N;

2 – зразок сталі 38X2МЮА з покриттям Ti–N

Рисунок 3.9 – Залежність коефіцієнтів тертя від навантаження

Як впливає з графіків на рис. 3.9 практично при всіх навантаженнях коефіцієнт тертя зразка зі сталі 38X2МЮА з покриттям ~ на 30 % менше, чим без покриття.

3.6 Дослідження характеристик міцності

Проведено комплекс досліджень для визначення характеристик міцності досліджуваних сталей після термообробки та після нанесення відповідних покриттів.

Результати досліджень наведено у табл. 3.8.

Таблиця 3.8

Результати досліджень характеристик міцності

№ зразка	Марка сталі	Вигляд зміцнювальної обробки	Наявність поверхневих дефектів	Твердість в зоні тертя HV_5	Остаточні напруження, $\sigma_{ост}$, МПа	Торцева твердість
1	Сталь 45	Загартування + високий відпуск	не виявлено	271-283	210	180-192
2	Сталь 45	Карбонітрація	не виявлено	396-450	250	320-340
3	38X2МЮА	Загартування + високий відпуск	не виявлено	300-320	240	315-320
4	38X2МЮА	Покращення + азотування	не виявлено	349-362	260	329
5	38X2МЮА	Покращення + покриття Ti-N	не виявлено	550-570	490	410-430

Зразок №1 зміцнення гартуванням з наступною високою відпусткою. Зміни твердості на поверхні цього зразка в результаті випробувань не виявлено.

Зразок №2 спостерігається деяке збільшення твердості H_v поверхні тертя в порівнянні з твердістю серцевини. Що може бути пояснена двома допустимими причинами: підвищення вмісту вуглецю та азоту в поверхневому шарі в результаті карбонізації після термічної обробки; зміцнення поверхневого шару в процесі випробувань.

Зразок № 3, який після поліпшення зміцнився азотуванням, має закономірне підвищення твердості.

У зразка № 5 покриття при металографічному дослідженні поперечного шліфу не виявляється через його малу товщину (менше 5 мкм). Незначно, однак, підвищення твердості цього зразка порівняно з серцевиною пояснюється впливом плазмового покриття Ti-N. Рентгеноструктурні дослідження показали, що в приповерхневих шарах всіх зразків присутні залишкові радіальні напруги стиснення.

Для зразків № 1, 2, 3 величина цих напруг перебуває практично одному рівні (-210...260 МПа).

У зразку № 5 з покриттям Ti-N у приповерхневих шарах виявлено максимальний рівень залишкової стискаючої напруги (-490 МПа), що можна пов'язати з впливом плазмових покриттів Ti-N.

3.7 Визначення нанотвердості та модуля пружності

Значення нанотвердості визначалося за методикою Олівера та Фара за глибиною відбитка при максимальному навантаженні на індентор. Модуль пружності визначали за кривою розвантаження індентора за допомогою приладу «Nano Indenter II».

У табл. 3.8–3.9 наведено отримані значення нанотвердості та модуля пружності при різних навантаженнях різних глибинах впровадження індентора.

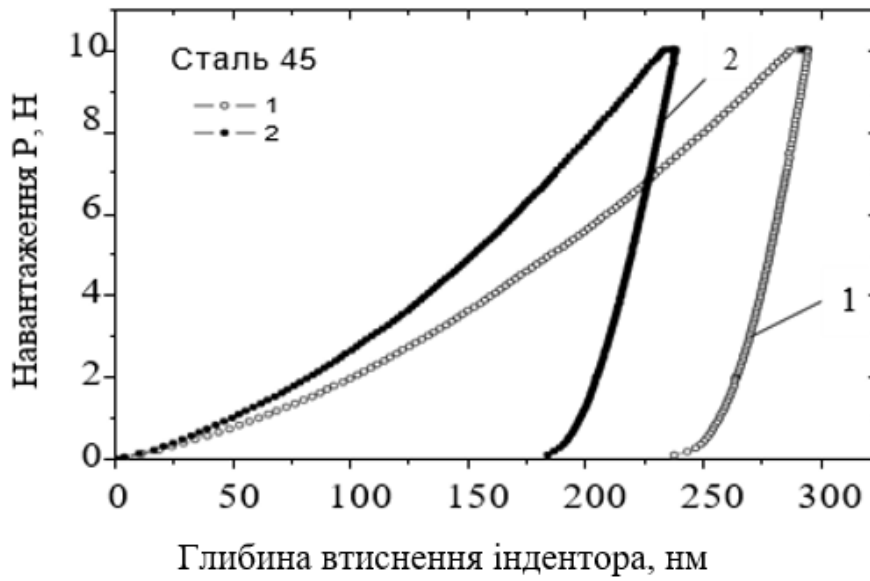
Проведено аналіз результатів одержаних значень нанотвердості. На рис. 3.12 представлені гістограми, з яких випливає, що нанотвердість сталі 38Х2МЮА з плазмовим покриттям у 2 рази вище, ніж нанотвердість сталі 45 з карбонітридним покриттям.

Проведені дослідження показали, що збільшення навантаженні у 5 разів з 10 мН до 50 мН несуттєво впливає на значення нанотвердості (рис. 3.13).

Таблиця 3.9

Результати наноіндентування для сталі 45

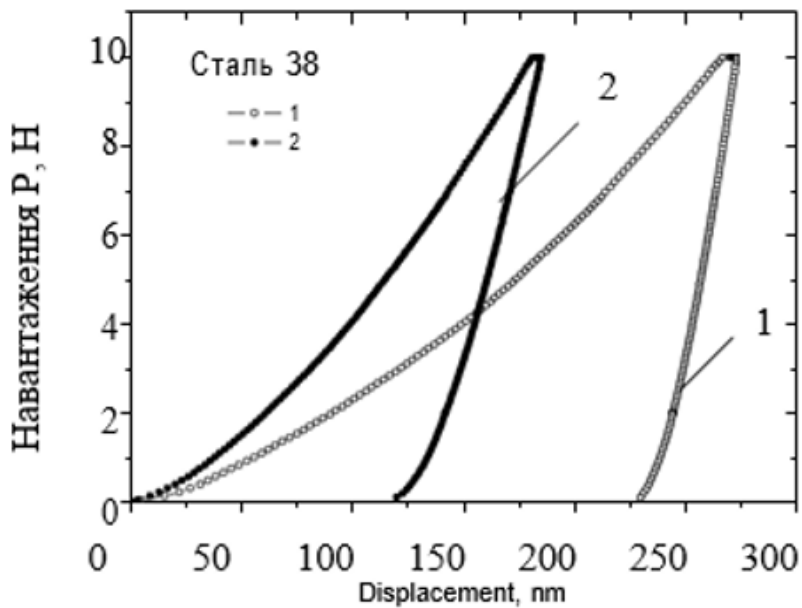
Вид обробки сталі 45	Глибина втиснення м інд. (nm)	Навантаження, мН	Модуль пружності, E(F), ГПа	Нанотвердість H(F), ГПа
полірований без покриття	307,3	10,0	226	4,2
	325,0	10,0	199	3,8
	292,7	10,0	217	4,7
	294,7	10,0	208	4,6
	341,0	10,0	223	3,5
	312,1	10,0	214	4,2
станд. відхил.	20,6	0,0	11	0,5
після карбонітрація	252,0	10,0	205	6,4
	240,2	10,0	198	7,1
	238,2	10,0	216	7,1
	236,1	10,0	220	7,2
	244,2	10,0	213	6,8
Середнє	242,1	10,0	210	6,9
станд. відхил.	6,2	0,0	9	0,3



1 – сталь 45 без поверхневої обробки;

2 – сталь 45 після карбонітрації

Рисунок 3.10 – Діаграма індентування сталі 45



Глибина втиснення індентора, нм

○ 1 – сталь 38Х2МФЮА без поверхневої обробки;

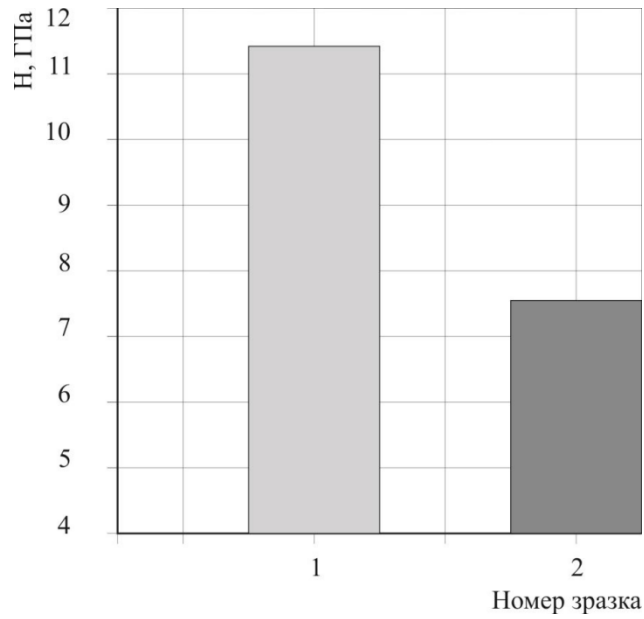
● 2 – сталь 38Х2МФЮА після нанесення плазмового покриття Ti-N

Рисунок 3.11 – Діаграма індентування сталі 38Х2МФЮА

Таблиця 3.10

Результати наноіндентування для сталі 38Х2МЮА

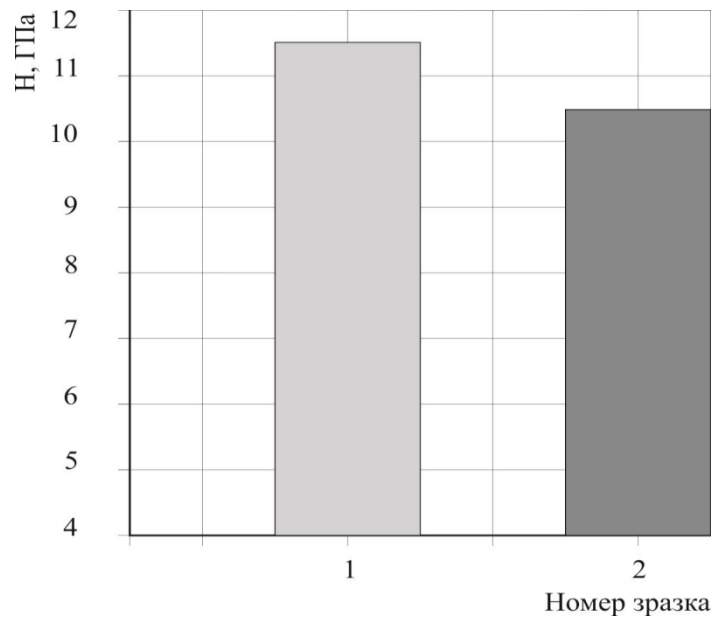
Вид обробки сталі 38Х2МЮА	Глибина втиснення інд. (nm)	Навантаження, mH	Модуль пружності Е, ГПа	Значення твердості Н, ГПа	Рівень твердості по ISO 14577
Полірований без покриття	286,6	10,0	211	4,9	Мікротвердість
	286,5	10,0	213	4,9	
	282,1	10,0	215	5,0	
	273,3	10,0	216	5,4	
	300,6	10,0	204	4,5	
	285,8	10,0	212	4,9	
станд. відх.	9,9	0,0	5	0,3	
з покриттям Ti-N	191,1	10,0	229	11,3	Нанотвердість
	181,7	10,0	246	12,4	
	193,3	10,0	230	11,7	
	188,8	10,0	226	11,0	
	185,1	10,0	220	12,3	
Середнє	188,0	10,0	230	11,7	
станд. відхил.	4,6	0,0	10	0,6	
з покриттям Ti-N	500,4	50,0	228	10,3	Мікротвердість
	484,9	50,0	247	10,9	
	501,7	50,0	236	10,2	
Середнє	495,7	50,0	237	10,5	
станд. відхил.	9,3	0,0	9	0,4	



1 – нанотвердість плазмового покриття, нанесеного на сталь 38Х2МЮА;

2 – нанотвердість карбонітридного покриття, нанесеного на сталь 45

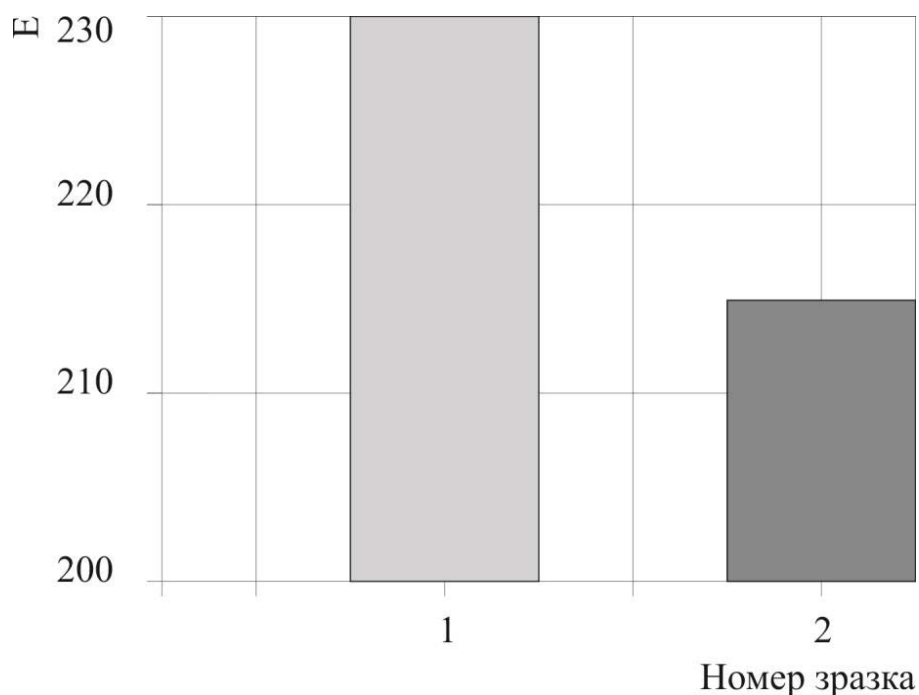
Рисунок 3.12 – Гістограми нанотвердості при навантаженні 10 мН



1 – навантаження 10 мН; 2 – навантаження 50 мН

Рисунок 3.13 – Гістограми нанотвердості плазмового покриття, нанесеного на сталь 38Х2МЮА

Слід також відзначити вищий рівень модуля пружності плазмового покриття, нанесеного на сталь 38Х2МЮА, порівняно з карбонітридним покриттям, нанесеним на сталь 45 (рис. 3.14). Це свідчить про те, що в сталі 38Х2МЮА при вищих напругах настає момент пластичної деформації.



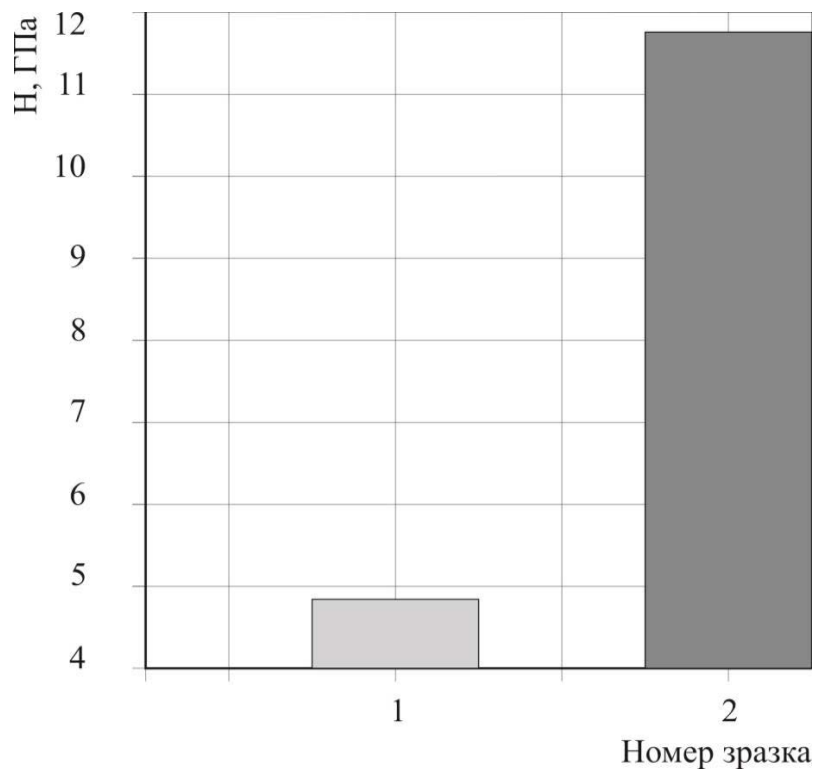
1 – сталь 38Х2МЮА с плазмовим покриттям;

2 – сталь 45 с карбонітридним покриттям

Рисунок 3.14 – Гістограми модуля пружності E

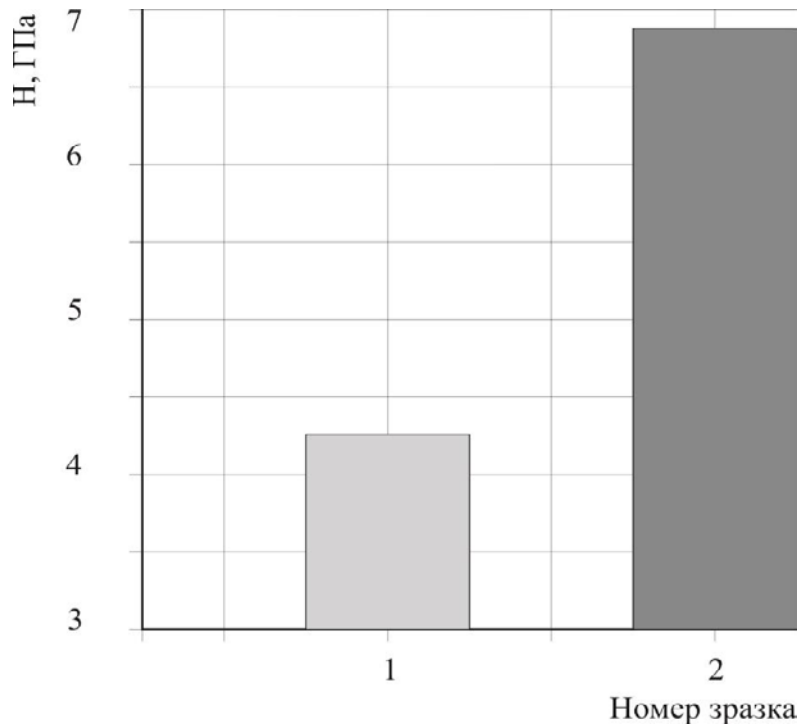
Показовим також є ефект зміцнення за рахунок нанесення покриття. Так, наприклад, плазмове покриття, нанесене на сталь 38Х2МЮА, сприяє підвищенню твердості в 2,5 рази, а карбонітридне покриття на сталь 45 забезпечує підвищення твердості всього в 1,5 рази (порівняйте рис. 3.15 та 3.16).

Таким чином, з метою підвищення зносостійкості та механічних властивостей робочих поверхонь констрiл прецизійних вузлів тертя можна рекомендувати застосування сталі 38Х2МЮА, на яку наноситься плазмове покриття.



1 – без покриття; 2 – з плазмовим покриттям

Рисунок 3.15 – Гістограми нанотвердості сталі 38Х2МЮА



1 – без покриття; 2 – з карбонітридним покриттям

Рисунок 3.16 – Гістограми нанотвердості сталі 45

Для підвищення робочих характеристик деталей об'ємного гідроприводу, виготовлених із сталі 38Х2МЮА, вибрано іонно-плазмове покриття Ti–N завтовшки 6 мкм.

Зносні випробування показали, що нанесення покриття Ti–N на сталь 38ХМЮА зменшує знос у 3 рази.

Встановлено, що нанотвердість сталі 38Х2МЮА з плазмовим покриттям у 2 рази вище, ніж нанотвердість сталі 45 з карбонітридним покриттям.

Методами рентгенівського та мікрорентгенівського дослідження встановлено, що покриття, що наноситься за обраними режимами, складається з титану, азоту, вуглецю. У ньому утворюються стискаючі напруги (до 1800 МПа), що сприяє підвищенню робочих характеристик.

РОЗДІЛ 4.

ВСТАНОВЛЕННЯ ДОПУСТИМИХ ПРИЧИННО-НАСЛІДКОВИХ ВІДНОСИН НА ПРИКЛАДІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕОРІЇ МУЛЬТИФРАКТАЛІВ

4.1 Про неповноту формальної аксіоматики у завданнях ідентифікації характеристик якості

Актуальність реалізації цієї глави обумовлена тим, що встановити однозначне відповідність між елементами структури металу та її властивостями найчастіше є проблематичним завданням, оскільки елементи структури найчастіше різних масштабних рівнях (макроструктура, мікроструктура, тонка структура) мають складну геометричну конфігурацію форми. На підставі аналізу кількісної та якісної оцінки реальних структур багатьох залізовуглецевих сплавів спостерігаються деякі значні для використання в практичних цілях розбіжності між результатами прямих експериментів ідентифікації структури металу та методами їх прогнозування. Так, наприклад, розбіжності між результатами прогнозу ударної в'язкості (рис. 4.1 *a*) і твердості (рис. 4.1 *б-г*) прокатних чавунних валків виконання СПХН, заснованого на визначенні площі структурних складових (перліту, карбідів, пластинчастого графіту) і балової (напівколи) оцінки графіту, що свідчать про труднощі, які виникають при прогнозі якісних характеристик валків із застосуванням відомих раніше методик.

Цей факт свідчить про неповноту формальної аксіоматики, що виникає при описі елементів структури металу за допомогою тради-

ційних фігур геометрії Евкліда, що ініціює необхідність використання інших перспективних підходів до оцінки структури.

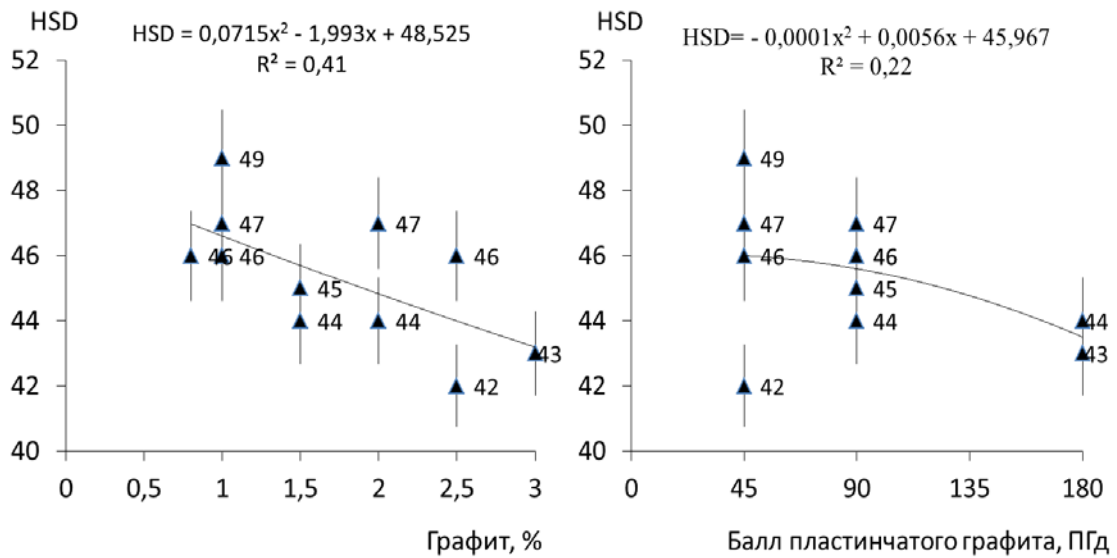
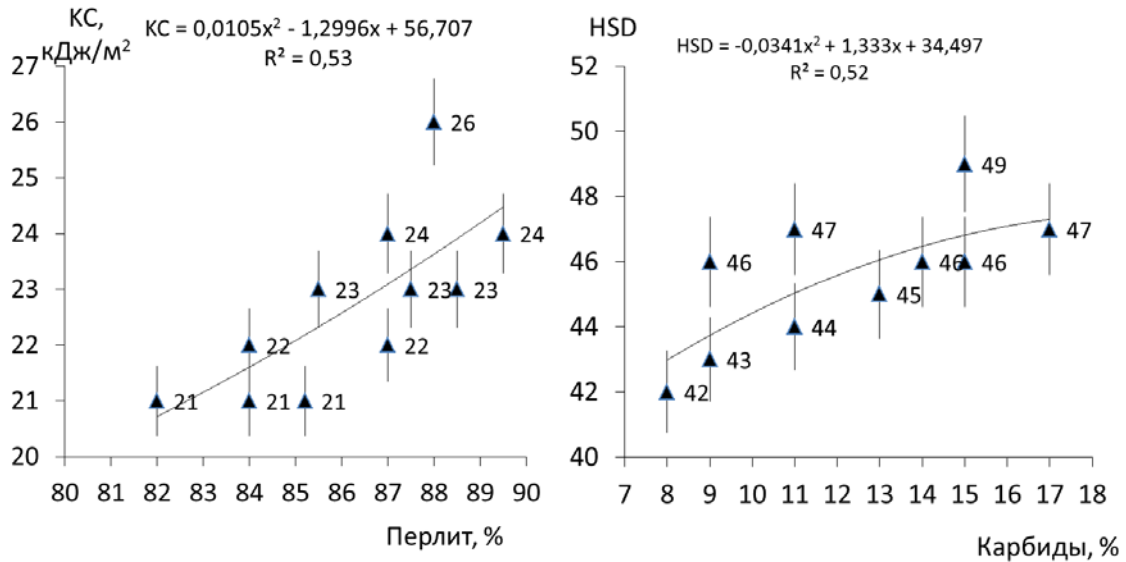


Рис. 4.1. Залежність ударної в'язкості (а) твердості (б-г) від параметрів структури валкового чавуну з пластинчастою формою графіту

У теоремі Геделя про неповноту доведено, що в теоріях, що конструюються на підставі формальної аксіоматики, значення вихідних термінів та їх інтерпретації є неповними, що обумовлено мовною неповнотою тверджень [101].

У цьому, поширюючи висновки з цієї теореми на інтерпретацію твердження, що визначає, наприклад, те чи інше чисельні значення якості якогось металу приймаємо, що це твердження неповне. Ця неповнота зумовлена деякою невизначеністю, викликаною, насамперед, відносністю вимірювань, без яких неможливо обійтися, визначаючи ту чи іншу закономірність і неминучою неповнотою формулювань тверджень, зроблених мовою, якою проводиться інтерпретація цих тверджень. Для часткового усунення неповноти формальної аксіоматики тверджень С. Бір рекомендував використовувати принцип зовнішнього доповнення, заснований на застосуванні мови вищого рівня, що застосовується для формулювання тверджень [121]. Новообрані рішення, виражені мовою вищого рівня, покликані усувати недоліки спочатку використовуваної мови. Застосування новообраної мови виступає як практичний метод, спрямований на часткове подолання складності, яка є наслідком, що випливає з теореми Геделя. С. Бір рекомендував, щоб вийти за межі спочатку обраної мови, але в той же час не відірватися від реальної ситуації, слід прив'язатися до такої властивості системи, яка нерозривно пов'язана з її дійсним існуванням.

Наприклад, очевидно, для більшості матеріалів такою властивістю є та чи інша характеристика їхньої якості. Для того, щоб це показати, зупинимо свій вибір на існуючих в даний час процесах ідентифікації структури матеріалу, яка, як показує досвід та численні теоретичні дослідження, відображає характеристики його якості [93-117].

При цьому апроксимація елементів структури зі складною геометричною конфігурацією форми, як правило, проводиться цілими фігурами Евкліда [62], що вносить певну похибку в знаходження характеристик якості матеріалу. Цей факт ініціює необхідність можливої заміни геометричних характеристик елементів структури (довжина, площа, обсяг) більш диференційовану оцінку, що, передбачається, має частково компенсувати неповноту існуючої формальної аксіоматики.

Розвиток методів оцінки структури матеріалів з урахуванням науково-технічного прогресу вивів на новий ступінь можливість проводити їх кількісну оцінку. Для дослідження структури та властивостей металів і сплавів застосовуються традиційні методи рентгеноструктурного аналізу, оптичної та електронної мікроскопії, термічного аналізу, мікрорентгеноспектрального зондування, ядерно -магнітного резонансу, Оже –спектроскопії та ін. Взаємозв'язок між параметрами структури металів та комплексом їх фізико багатьох авторів [75-110]. Цей підхід дозволяє врахувати вплив елементів структури металу з його властивості з метою уточнення. Однак складність в отриманні такого роду результатів полягає в тому, що багато елементів структури металу, завдяки своїй складній конфігурації, важко піддаються кількісному опису, що призводить до втрати важливої інформації про тандем структура властивості –. До таких характеристик можна віднести існуючу зараз оцінку елементів мікроструктури металу за допомогою нормативних існуючих документів, що використовують в основному балову (напівкількісну) оцінку. Для металу присутність елемента суб'єктивності при оцінці параметрів його структури спостерігається, наприклад, при кількісній оцінці пластинчастого, вермікулярного та кулястого графіту, ледебуритної евтектики, голчастого фериту, голк мартенситу, видманштеттового фериту, верхнього та нижнього

бейніту. що пояснюється складною конфігурацією їх геометричної форми. Для оцінки таких структур необхідно запровадження нового кількісного показника структури.

Перелічені труднощі оцінки структури металу ініціюють пошук принципово нових методів оцінки його структури з метою визначення спектру його фізико-механічних властивостей, які б при мінімально можливих витратах забезпечували необхідну точність результатів досліджень.

З метою часткового усунення неповноти формальної аксіоматики тверджень, що продукуються при ідентифікації структури металу, згідно з принципом зовнішнього доповнення С. Біра, використовуємо для формулювання тверджень мову вищого рівня, яка повинна усувати недоліки мови, що спочатку використовується.

Для часткової компенсації неповноти формальної аксіоматики структури металу застосуємо мову вищого рівня. На наш погляд, такою мовою є мова фрактальної геометрії, введена Б. Мандельбротом [120]. Існуючі у світі фрактали називаються фізичними, і вони мають кінцевий інтервал масштабів. Їхнє фізичне визначення наступне: *Фрактали* –це геометричні об'єкти (лінії, поверхні, тіла), що мають сильно порізану структуру і мають властивість самоподібності в обмеженому масштабі.

Визначення 1.1. Фрактал - це функціональне відображення або безліч, що отримується нескінченним рекурсивним процесом і має такі властивості: 1). Самоподібність чи масштабну інваріантність (нескінченний скейлінг), тобто фрактали на малих масштабах виглядають у середньому так само, як і на великих; 2). Розмірність фракталу –дробова величина і строго більша за свою топологічну розмірність (розмірність Хаусдорфа); 3). Фракталам властива недиференційність.

Ще одне, просте, визначення фракталів: Фракталами називаються об'єкти, які мають дробову розмірність і мають властивість самоподібності ⁶[62]. Я.Б. Зельдович та Д.Д. Соколов дають фрактал наступні визначення: "Фракталь - товста лінія, фракталь - товста поверхня, фракталь - спінений простір-час, фракталь - лінія рівня, фракталь - густе безліч точок" [62]. А.Д. Морозов розширює поняття фрактал до геометричної структури зі статистичним самоподібністю [62].

Існуючі у світі фрактали називаються фізичними, і вони мають кінцевий інтервал масштабів. Їхнє фізичне визначення таке:

Визначення 1.2. "Фрактали - це геометричні об'єкти (лінії, поверхні, тіла), що мають сильно порізану структуру і мають властивість самоподібності в обмеженому масштабі".

Слід зазначити, що представлені визначення фракталу лише доповнюють одне одного, допомагаючи глибше розібратися у їхній природі.

Фрактальні об'єкти відображають метрику простору, на відміну від цілої евклідової геометрії, яка вивчає крім метрики ще й форму об'єктів. Метрика задає спосіб побудови такої множини, яка апроксимує структуру, що розглядається. Топологія, своєю чергою, вивчає лише форму об'єктів [68, 69].

У ряді наукових праць останніх років було показано, що одним із перспективних шляхів адекватного вирішення проблеми оцінки структури є застосування мови фрактальної геометрії [60-80]. Багатостороннє застосування фрактальної геометрії в матеріалі денії послужило поштовхом у створенні та розвитку фрактального матеріало-

⁶Якщо за геометричною формою кожної частини об'єкта можна відтворити весь об'єкт, то частина і весь об'єкт називаються самоподібними. Така операція інваріантна щодо масштабу [2].

знавства . Одними з перших робіт з фрактального матеріалознавства можна вважати роботи Б.М. Смирнова, Є. Федера, В.С. Іванової та інших (див. напр.[60-80]). Серед наукових праць вітчизняних учених на високу оцінку заслуговують роботи С.В. Свеснікова, В.П. Шестопалова [62], А.Ф. Турбіна та Н.В. Трудовитого [62]. Діяльність С.В. Свеснікова "Матеріали з кластерною структурою –нові властивості, нові можливості" пильну увагу приділено нанокристалічній структурі кластерних матеріалів, яка кількісно описана завдяки фрактальній розмірності. У ній наголошується, що у природі, як з'ясувалося, фрактальні форми поширені надзвичайно широко. З кластерами їх зближують умови зростання за однаковим механізмом дифузійної сегрегації, –що розповзається, розряджена структура і дробова розмірність, характерна, взагалі кажучи, для неупорядкованих систем. У матеріалознавстві, для опису елементів мікроструктури, традиційно використовується евклідова розмірність d , що характеризується чотирма значеннями: $d = 0$ для точкових дефектів (вакансії, міжвузельні атоми); $d = 1$ для лінійних дефектів (дислокації); $d = 2$ для планарних дефектів (двійники, межі зерен тощо); $d = 3$ для тривимірних утворень обсягом зразка.

Поняття фрактала практично пов'язане, як з характеристикою структури металу, так і з фізичними характеристиками виробів, що виготовляються з нього: з шорсткою поверхнею; обсягом; щільністю та ін. Цей вибір заснований на тому, що величезна кількість реальних фізичних систем має (у відповідних діапазонах масштабів) фрактальну природу, що характеризується дробовою розмірністю D_0 (розмірністю Хаусдорфа-Безиковича) [62]:

$$D_0 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{\ln N(\delta)}{\ln \delta}, \quad (4.1)$$

де $N(\delta)$ – кількість клітин, що покрили досліджуваний об'єкт, δ – лінійний розмір клітки.

Фрактальна розмірність інваріантна щодо масштабу об'єкта, що досліджується (рис. 4.2). При виборі масштабів менших критичного⁷ або більшого критичного фрактальна розмірність залежить від екстраполяції або інтерполяції [62].

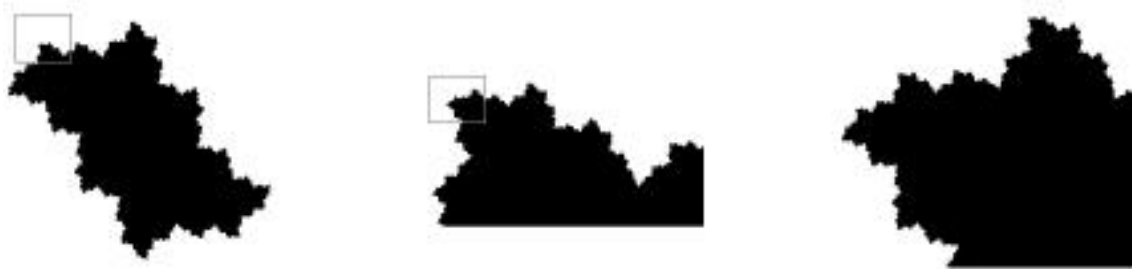


Рис. 4.2. Інваріантність щодо масштабу фрактальної розмірності об'єкта [62]

Фрактальні об'єкти відображають метрику простору, на відміну від цілої евклідової геометрії, яка вивчає крім метрики ще й форму об'єктів. Метрика задає спосіб побудови такої множини, яка апроксимує структуру, що розглядається. Топологія, у свою чергу, вивчає лише форму об'єктів [62].

Допустимо, що об'єктом ідентифікації є структура шліфу деякого матеріалу. Назвемо відстанню між двома точками a і b поверхні цього шліфу довжину найкоротшої з дуг, що лежить усіма своїми точками на його поверхні і з'єднує ці дві точки. Задана таким чином метрика є внутрішньою метрикою поверхні, а сама поверхня перетворюється на метричний простір. Звідси випливає, що внутрішня метри-

⁷Критичний масштаб - масштаб, який більший за початковий масштаб і співмірний з розмірами об'єкта.

ка структури поверхні шліфу являє собою закономірність «закладену» в цій структурі. Зазначимо, що поняття метрики нерозривно пов'язані з поняттям розмірності. Наприклад, довжина фрактальної кривої L може бути обчислена як $L(\varepsilon) \approx \varepsilon^{1-d}$, де ε – довжина ланки ламаної лінії, що замінює криву L , а d – фрактальна розмірність цієї кривої. Звідки слід, що й внутрішня метрика структури поверхні шліфу є функцією його фрактальної розмірності, то ній відбиваються якісні характеристики матеріалу [62].

Фрактальна геометрія дозволила дати кількісну характеристику безлічі Кантора, кривим Пеано, функцій Вейерштрасса та їх численним різновидам, які вважалися нонсенсом. Рівна одиниці для прямої (нескінченної, напівнескінченної або кінцевого відрізка), розмірність Хаусдорфа-Безиковича збільшується у міру зростання звивистості, тоді як топологічна розмірність завзято ігнорує всі зміни, що відбуваються з лінією, якщо вони не супроводжуються розривом або склеюванням якихось точок. У цьому, збільшуючи своє значення, розмірність Хаусдорфа - Безиковича не змінює його стрибком, а приймає дробові значення (рис.4.3).

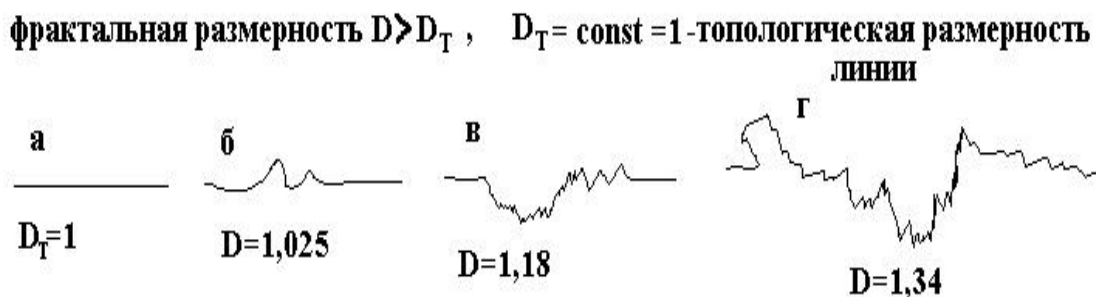


Рис. 4.3. *а* – топологічна та фрактальні розмірності рівні одиниці для прямої; *б* – фрактальна розмірність дорівнює 1,025 для злегка звивистої лінії; *в* – для більш звивистої вона дорівнює 1,18; *г* – для дуже звивистої - 1,34 [62]

З урахуванням відсутності задовільних математичних описів процесів, що відбуваються, наприклад, при легуванні металів (тобто таких, які б застосовувалися при практичних розрахунках і були б достатньо надійними) можна припустити, що така складна система, як метал, точніше її складові, має не цілу, а дробову розмірність, тобто. ця система відноситься до фракталів.

Евклідові розмірності можуть бути характеристиками симетричних мікроструктур, які часто утворюються навіть у матеріалах, одержуваних у квазірівновесних умовах, оскільки формування реальної структури обумовлено явищами далекими від рівноважних. На відміну від цілої чисельної евклідової геометрії, фрактальна геометрія характеризується спектром фрактальних розмірностей для кожного елемента структури металу в одновимірному просторі (пряма), двовимірному просторі (площина) і т.д. Фрактальна розмірність чутлива до зміни структурних складових, чого може врахувати цілочисленна евклідова геометрія. Так, наприклад, поверхня розділу між твердим тілом і навколишнім простором може бути фрактальною. Це може бути:

–поверхневий фрактал – у разі площа поверхні характеризується показником фрактальної розмірності D , а обсяг твердого тіла і обсяг пір змінюються як обсяг зразка у всьому інтервалі аналізованих масштабів, тобто. характеризуються цілою чисельною евклідовою розмірністю R^3 ;

–масовий фрактал – у цьому випадку площа поверхні та об'єм твердого тіла характеризуються показником D , а об'єм пор змінюється як повний об'єм;

–фрактал пор – у цьому випадку площа поверхні та обсяг пор змінюються однаково (з показником D), а обсяг твердого тіла змінюється як повний обсяг (див. рис. 4.4).

Хоча алгоритми побудови деяких фракталів були відомі вже давно, проте побачити їх через складну реалізацію з'явилася можливість лише з розвитком комп'ютерних технологій. Фрактали, зображені на рис. 4.5 вдалося отримати тільки завдяки комп'ютерному моделюванню. Деякі з наведених на рис. 5.5 фрактальних об'єктів можна порівняти із реальними структурами матеріалів. Так, наприклад, фрактал, отриманий за допомогою "повороту - стиснення" (рис.4.5 δ) може нагадувати дендритні структури металів. Підбираючи різні способи перетворення евклідових фігур, можна за допомогою моделювання досягти отримання таких структур, які будуть аналогами реальних структур матеріалів або їх окремих елементів. Це дозволить глибше розібратися у реальній будові структури матеріалу.

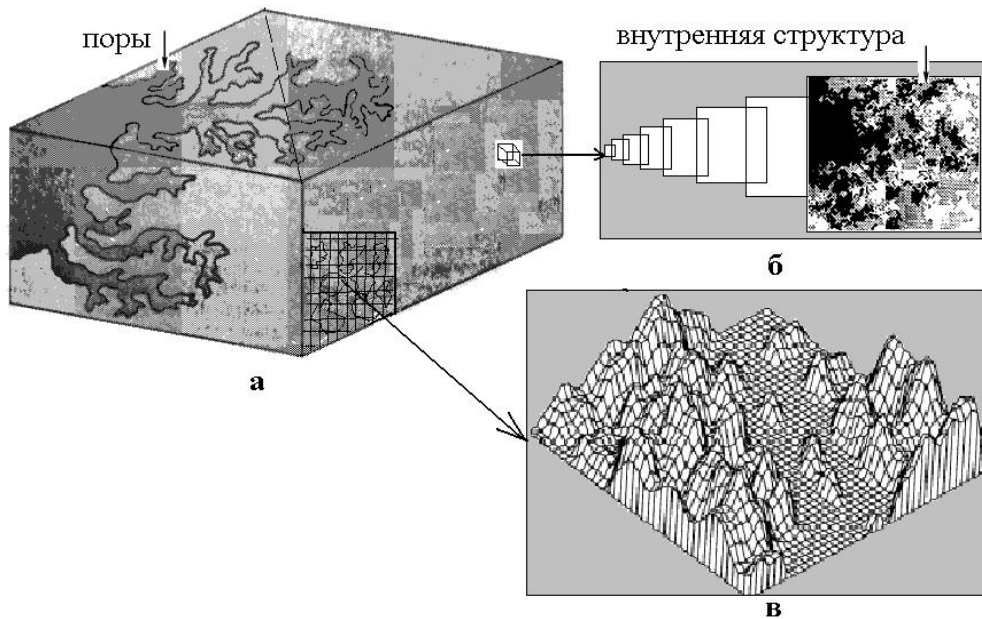


Рис. 4.4. Фрактал пор (a), масовий фрактал (b), поверхневий фрактал ($в$)

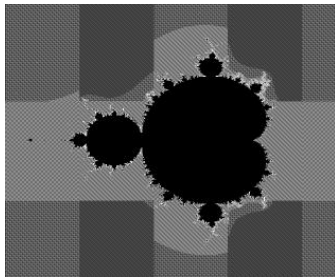
Таким чином, тільки для $D \rightarrow 3$ трьох розглянутих вище класу фракталів збігаються. Якісно визначити, чи є та чи інша поверхня матеріалу фрактальною, можна, розглядаючи її під оптичним мікроскопом, а при необхідності і під електронним, при різних збільшеннях. У фрактальних поверхнях відсутній масштаб довжини, і при різних збільшеннях вони повинні мати практично одну фрактальну розмірність і виглядати однаково. Тому застосування фрактальної розмірності кількісної оцінки структури металу є важливим інструментом дослідження кількісних показників структури металу. У багатьох публікаціях наголошується, що фрактальна (дрібна) розмірність служить суворою кількісною характеристикою параметрів структури металів, що мають складну конфігурацію, наприклад: зерен, меж зерен, поверхонь крихкого та в'язкого руйнувань, скупчень дислокацій тощо. [62]. У фрактальній розмірності відображається компактність заповнення простору досліджуваним матеріалом. Оскільки структура будь-якого металу визначає його властивості, а фрактальна розмірність дає кількісну оцінку структурі, то, виходячи з цього, вона якимось чином має відображати деякі властивості металу. На користь застосування фрактальної розмірності для ідентифікації якісних характеристик металів, зокрема механічних властивостей, каже їхня універсальність. Серед них методи вертикальних перерізів та Фур'є-аналіз профілів, скейлінг (самоподібність) силового спектру, кореляційної функції, малокутового розсіювання, оптичної дифракції, варіограм, а також методи адсорбційних зондів, скін-ефекту, методи термодинаміки, ядерно-магнітного резонансу [62]. Фрактальність у природі проявляється всіх масштабних рівнях: починаючи від будови атомів і закінчуючи скупченнями галактик. Очевидно, через те, що

лише однією величиною фрактальної розмірності неможливо об'єктивно описати складну структуру реального матеріалу, було запроваджено поняття мультифрактала. Застосування мультифрактального формалізму відкриває широкі можливості у цьому плані. Характерно це, в першу чергу, для металів, структура яких складається з кількох фаз (наприклад, ферито-перлітна, змішана ферито-бейнітна, ферито-бейнітно-мартенситна структури і т.д.), які характеризуються спектром статистичних розмірностей. Використання концепції мультифракталів відкриває можливість пошуку кореляційних співвідношень між показниками властивостей та параметрами зовнішнього впливу, з одного боку, та структурою металу – з іншого. Застосування статистичних розмірностей елементів структури з метою оцінки якісних характеристик металу сприяє їх формалізації як функції фрактальної розмірності. У свою чергу це уможливорює визначення та прогнозування фізико-механічних властивостей металу, не виробляючи спеціальних механічних випробувань. Слід зазначити, що застосування фрактальної розмірності для оцінки структури металу з метою визначення його якісних характеристик ні в якому разі не замінює інших методів, спрямованих на вирішення цієї проблеми, а доповнює їх, оскільки надає досліднику додаткову інформацію про взаємозв'язок структура – властивості.

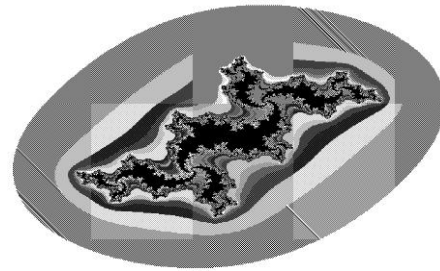
Якщо евклідова геометрія є цілочисленною розмірністю, наприклад, нульова розмірність у точки (міжвузьковий атом), одинична – у прямій (дислокації), у площині 2 (кордон зерна), у об'єму 3 (дисперсійна частка), то фрактальна розмірність дає кожній складовій структурі власну кількісну оцінку. Виявляється, що практично всі матеріали в природі фрактальні на різних масштабних рівнях [62]. Верх-

ній масштабний рівень обмежений розмірами цілого об'єкта, нижній обмежений його атомної структурою.

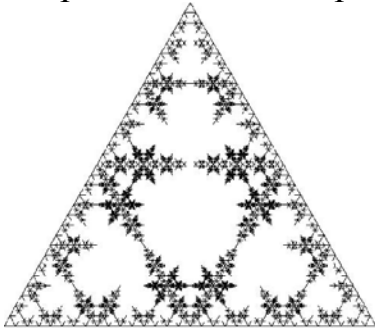
Фрактальні відомі класичні об'єкти, такі як сніжинка Коха, трикутник та килим Серпінського, фрактал Мінковського виходять шляхом відповідного покрокового перетворення евклідових фігур: лінії, трикутника, квадрата, куба тощо. Існує ще безліч модифікацій перетворення евклідових фігур на фрактальні (рис. 4.5) [622].



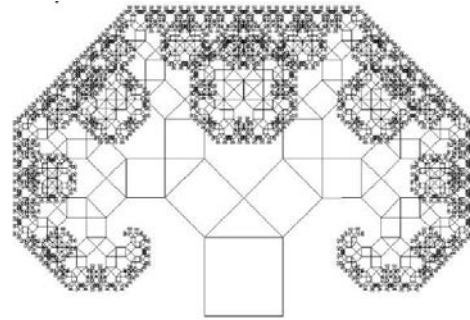
a – Фрактал Мандельброта



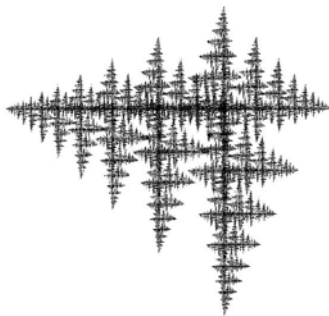
б – Фрактал Жюлія



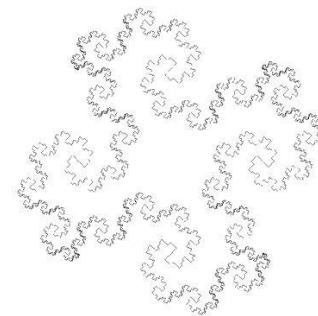
в – "Льодовий" трикутник



г – "Дерево" Піфагора



д – Фрактал, отриманий за допомогою "повороту - стискування"



е – "Острів" Мінковського

Рис.4.5. Фрактальні об'єкти, отримані при покроковому перетворення евклідових фігур

Складна конфігурація мікроструктурних складових не дозволяє давати повну адекватну оцінку цим параметрам і всій мікроструктурі загалом. В основному цей розрахунок проводиться завдяки вивченню статистичних параметрів мікроструктурних складових металу і вивченню кожної фази окремо, а вивчення багатофазних систем і зовсім утруднено.

Крім того, з урахуванням різного виду перетворень і фазових переходів, у металах і композитах не існує чітко встановлених кордонів між структурними складовими, завдяки чому вони самі та їх межі набувають складної форми, і не мають, у класичному сенсі, кінцевої міри (довжини, площі і т.п.). Фрактальні структури металів наведено на рис. 4.6.

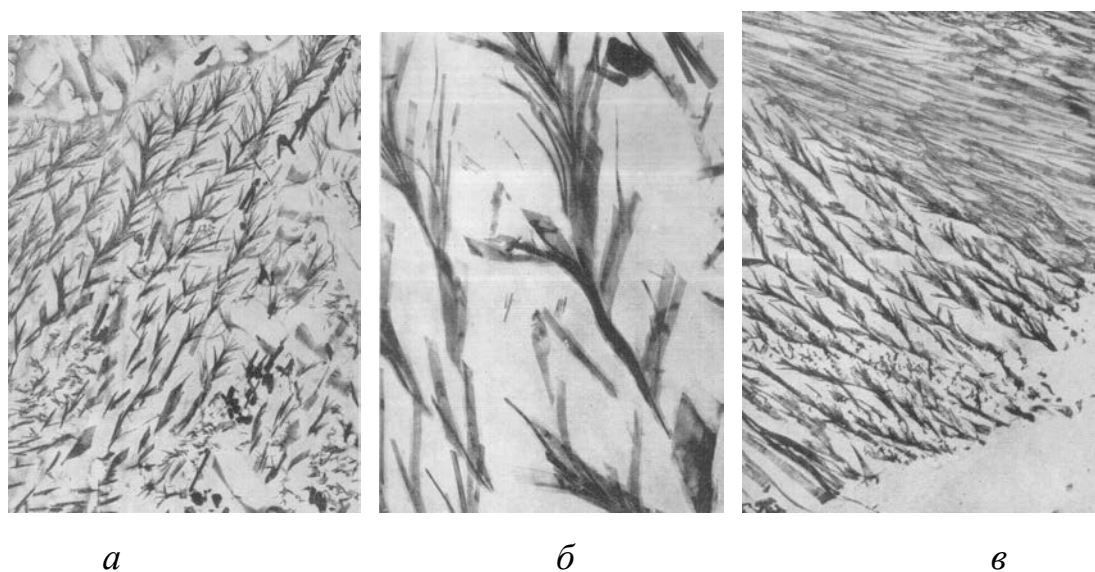


Рис. 4.6. Структура металу: *а*– екстракційна репліка дендритної структури пластинчатих карбідів хромомолібденової сталі, $\times 10000$;
б– область дендритної структури малюнка , $\times 40000$;
в– екстракційна репліка карбіду перліту Me_7C_3 ($\times 5000$) [62]

Тому доцільно використовувати апарат фрактальної геометрії для кількісної оцінки мікроструктури, оскільки, як показано в публікаціях [75-80], фрактальна розмірність структури може бути індикатором її якісних характеристик. Однак на цьому шляху є певні труднощі, пов'язані із встановленням зв'язку між фрактальною структурою матеріалів та їх властивостями. Останнє продиктоване відсутністю правила переходу від величини фрактальної розмірності структури до чисельного значення тієї чи іншої якісної характеристики металу. Федер Енс досліджував фрактальну структуру кластерів заліза, золота, цинку [62].

У перелік основних напрямів використання фрактальної геометрії в матеріалознавстві можна в даний час включити:

Моделювання структури реальних об'єктів.

Опис процесів формування реальної структури матеріалів (зародження та зростання кластерів, дендритів).

Параметризація структур або окремих елементів, зокрема, мають складну конфігурацію:

–для мікроструктурного рівня –зубчасті межі зерен, мартенситні та бейнітні структури, голчастий ферит та ін;

–для макроструктурного рівня –пори, тріщини, дендрити у структурі злитків та інших.

Покажемо, як відрізняються характеристики якості чавуну з використанням для апроксимації його структури, як методу металографічного аналізу, так і методу, що базується на застосуванні теорії фракталів [62]. Для конкретного прикладу для достовірності експерименту досліджуємо структуру двох ідентичних сортопрокатних чавунних валків №26 та №28 виконання СШХНМ–55, відлитих в одна-

кових технологічних умовах з ідентичним хімічним складом (табл. 4.1) і без проведення термообробки.

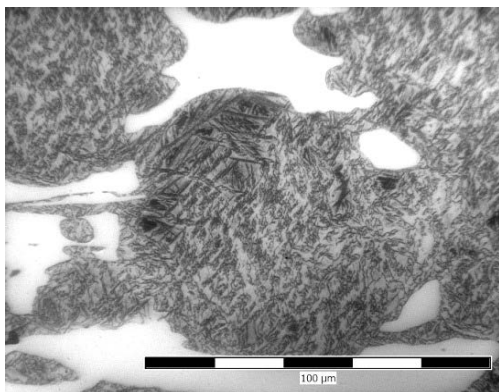
Таблиця 4.1

Хімічний склад валкового чавуну виконання СШХНМ-55

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Mg
2,95	1,22	0,56	0,034	0,012	0,63	3,55	0,43	0,10	0,008	0,058

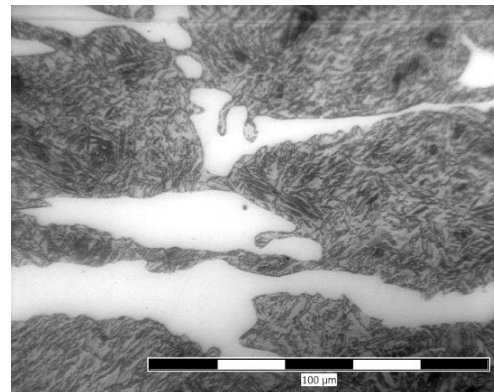
Розмір бочок валків становив 380630 ×мм. При цьому для обох валків виготовлялися шліфи з низу бочки, фотографії мікроструктури візуально різні (рис.4.7). Різниця зображень шліфів, ймовірно, обумовлена деякою невизначеністю, викликаною, перш за все, відносністю застосовуваних вимірювань, а неповнота тверджень, що інтерпретують результати експериментів, їх традиційною формальною аксіоматикою. Незалежно від ступеня візуальної збіжності зображень структури шліфів, з їх статистичного “подобі”, можуть практично, однаковою мірою відобразити характеристики якості чавуну, що, на даний момент, задовольняє практичному застосуванню результатів такого аналізу.

Валок №26



a

Валок №28



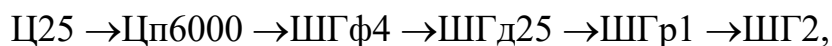
б

Рис. 4.7. Структура низу бочки валків виконання СШХНМ-55, що складається з бейніту, мартенситу, цементиту та кулястого графіту

З існуючих нині методів ідентифікації структури і властивостей чавуну, було обрано метод металографічного аналізу, як наукомісткий і продуктивний.

При цьому порівнювалися чисельні значення показників якості, отримані шляхом аналізу структури чавунних валків у трьох ділянках: низ бочки, верхній тріф та нижній тріф. Структура цих ділянок однакова за складом, але різна за геометричною формою своїх елементів (рис. 4.7).

Результати проведеного металографічного аналізу низу бочок ідентичні для валків №26 та №28, тобто .



де Ц – цементит, ШГ – кулястий графіт.

Оцінка структури чавуну, визначена виходячи з аналізу фрактальної розмірності елементів його структури, наведено у таблиці 4.2, рядки 1-4. За результатами аналізів визначалася характеристика якості валків (твердість), рядки 5 та 6 табл. 4.2.

Твердість обчислювалася статистично з урахуванням фрактальної розмірності структури:

$$\text{HSD} = 11571 \cdot D_{\text{ц}}^3 - 65754 \cdot D_{\text{ц}}^2 + 124279 \cdot D_{\text{ц}} - 78058, \quad (4.2)$$

$$\text{HSD} = 1719,5 \cdot D_{\text{р}}^3 - 9594,7 \cdot D_{\text{р}}^2 + 17792 \cdot D_{\text{р}} - 10906, \quad (4.3)$$

де HSD - твердість по Шору, $D_{\text{ц}}$ і $D_{\text{р}}$ - фрактальна розмірність цементиту та графіту відповідно.

Твердість чавуну, обчислена за цими рівняннями, трохи відрізняється від твердості, отриманої шляхом проведення натурних випробувань (розбіжність до 4%), що свідчить про доцільність використання мови фрактальної геометрії для оцінки якості металу.

Таблиця 4.2

Структура та твердість валків на відстані 15 мм від поверхні

п/п	Характеристика	Валок №26			Валок №28		
		низ бочки	верхній треф	нижній треф	низ бочки	верхній треф	нижній треф
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Фрактальна розмірність цементиту	1,935	1,971	1,939	1,938	1,969	1,947
2	Фрактальна розмірність кордонів цементних _ _ включень	1,384	1,416	1,399	1,390	1,418	1,409
3	Фрактальна розмірність графіту	1,707	1,880	1,870	1,724	1,920	1,888
4	Фрактальна розмірність меж графітних включень	1,080	1,226	1,222	1,385	1,257	1,261
5	Твердість по Шору, визначена шляхом натурних випробувань	60	55	58	61	55	58

Закінчення таблиці 4.2							
6	Твердість по Шору, з урахуванням фрактальної розмірності структури (за рівняннями (5.1 та 5.2))	58	54	56	61	53	57

Отримані результати показують, що характеристики якості чавуну, обчислені з урахуванням фрактальних розмірностей його структури, економічно доцільно виробляти, мінімізуючи при цьому кількість натурних випробувань.

4.2 Формалізація методики

З метою встановлення взаємозв'язку між елементами структури чавуну: перлітом, графітом, карбідами та обраними механічними властивостями: межею міцності на розрив і вигин; ударною в'язкістю; твердістю авторами використовувалася методика мультифрактального формалізму [60-80]. Запропонована методика є найбільш прийнятною для кількісної оцінки більшості реальних структур, апроксимація яких цілими численними фігурами Евкліда, вносить певну похибку, в силу цілісності їх апроксимації, і тому не завжди прийнятна в практичних завданнях. Відповідно до запропонованої методики, заснованої на мультифрактальному формалізмі, елементи структури більшості чавунів і сталей (ферит, перліт, бейніт, мартенсит, карбіди, графітні включення і т.д.) з неодно-

рідними ділянками можуть оцінюватися за допомогою спектра статистичних розмірів Реньї [69]. Деякі з розмірностей вже мають своє фізичне (матеріалознавче) трактування. Наприклад, у роботах [62-72] показано практичне застосування теорії фракталів, зокрема мультифрактального формалізму, в описі фізики процесу формування структури різних матеріалів [306-309], а також зв'язок їх фізико-механічних властивостей з розмірними оцінками фаз, наприклад для маловуглецевої низьколегованої сталі Ст3пс після різних режимів термообробки [62]. Із застосуванням мультифрактального аналізу вирішено багато матеріалознавчих завдань: оптимізовано режими одержання та властивостей оксидних покриттів на алюмінієвому сплаві [62], зафіксовано зміни зеренної структури алюмінієвого сплаву при ударному впливі швидкісною часткою, реалізовано моделі бейніто-мартенситна оцінка дисипативних властивостей різних металевих матеріалів; ідентифіковано механічні властивості металу обладнання хімічних виробництв при експертизі промислової безпеки [62]. Г.В. Встовський [62] зазначає, що використання концепції мультифракталів дозволяє давати адекватну кількісну оцінку не тільки конфігурації досліджуваної структури в цілому, але так само неоднорідності розподілу на ній геометричних, фізичних, хімічних та ін характеристик, відповідно до природи структури, що вивчається що неможливо досягти звичайними методами.

Розглянемо мультифрактальну природу тонкої структури металу з прикладу сталі 14Х2ГМР [62].

Структура зерна металу є неоднорідною. Причина неоднорідності структури зерна полягає, наприклад, у можливому коливанні хімічного складу в різних областях зерна (мікроликовація),

яка може бути результатом кристалізації, термообробки, деформації і т.д. Це позначається зміни структури зерна металу, тобто. різні ділянки зерна мають структурні особливості. Наприклад, на підготовленому шліфі мікросегрегація помітно відрізняється від інших областей зерна кольором, а відповідно хімічним складом та властивостями. З погляду фрактальної геометрії спостерігається невідповідність ймовірностей заповнення простору геометричним розмірам відповідних областей (наприклад, для металів це спостерігається різних масштабних структурних рівнях). При цьому фрактальна розмірність різних ділянок зерна, що мають схожу геометричну конфігурацію, може виявитися однаковою, але при цьому хімічний склад і властивості значно відрізнятимуться між собою. Виявляється, що поряд з геометричними характеристиками, що визначаються величиною фрактальної розмірності D , такі фрактали мають деякі статистичні властивості.

Розглянемо це на прикладі. Візьмемо на дослідження неоднорідну структуру сталі 14X2ГМР [62]. Виділимо на фотознімку цікаву трикутну область ⁸ABC (рис. 4.8). При розгляді даної області може виявитися, що щільність заповнення її елементами структури різних ділянках трикутника ABC різна.

⁹ Будується за аналогією з тріадною кривою Коха.

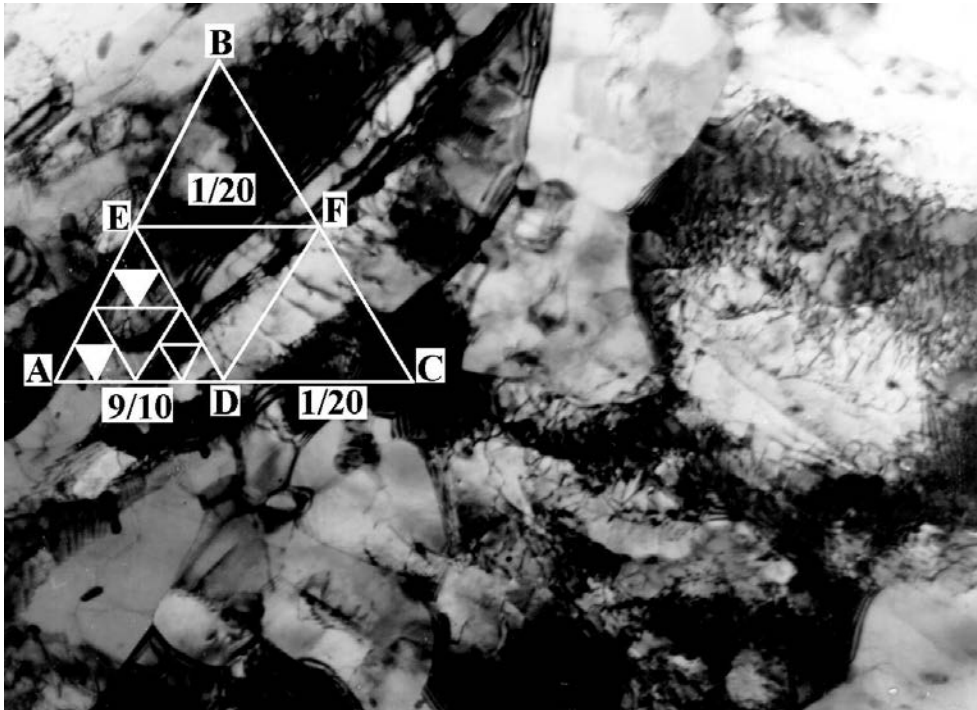


Рис.4.8. Приклад фрактал з неоднорідною структурою (мультифрактал). Структура сталі 14X2ГМР після загартування та відпуски протягом однієї години при $700^{\circ}\text{C}/\text{с}$. У рівносторонньому трикутнику знаходиться бейнітна область, $\times 30000$

Почнемо послідовно вирізати рівносторонні трикутники з області ABC. Застосуємо у разі метод випадкових ітерацій, як у [62]. Віддамо перевагу одній з вершин трикутника (цементитна область). Тобто припустимо, що в цю вершину потрапило 90% чорних включень з усієї виділеної області. Дві інші вершини B і A, як і раніше, рівноцінні, але на їхню частку припадає лише по 5% темних включень.

При покритті трикутної області ABC дедалі дрібнішими трикутниками видно, що темні точки всередині трикутника ABC розподілені тепер вкрай нерівномірно. Більша їх частина знаходиться у вершини C або її околиці, в той же час у вершин B і A (і їх околиць) темних точок

є менше. Тим не менш, це безліч точок (при прагненні числа ітерацій до нескінченності) є фракталом, оскільки зберігається основна його властивість –самоподібності. Дійсно, трикутник DFC , хоча в ньому зосереджено 90% темних точок, за своїми статистичними (кількість точок, включень або зерен на одиницю площі) і геометричними (конфігурація структури) властивостями подібний до великого трикутника ABC. Однак, незважаючи на нерівномірність розподілу точок за фракталом, його фрактальна розмірність залишилася при цьому колишньою, $D = \ln 3 / \ln 2$. Причина полягає в тому, що поряд з геометричними характеристиками, що визначаються величиною фрактальної розмірності, такі фрактали мають деякі статистичні властивості. Розглянута структура є мультифрактал.

Згідно з мультифрактальним підходом, кожен елемент структури може характеризуватись наступним спектром узагальнених статистичних розмірностей Реньї [69]:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \cdot \lim_{\delta \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \delta}, \quad (4.4)$$

де δ –осередок, що є одиничним елементом квадратної сітки, якою покривають об'єкт, що досліджується, для обчислення його розмірності, p_i –являє собою ймовірність попадання точки, що знаходиться на досліджуваному об'єкті, в i -ю комірку квадратної сітки з розміром δ , $\sum_{i=1}^N p_i^q$ –узагальнена статистична сума, що характеризується показником ступеня– q , який описує зміни спектра статистичних розмірностей об'єкта в діапазоні від $-\infty + \infty$.

Як показано в роботі [103], розмірності спектра $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$ мають наступний фізичний зміст: D_0 –однорідний фрактал при $q = 0$ (розмірність Хаусдорфа-Безиковіча); D_1 –інформаційна розмірність при $q = 1$ (інформаційна ентропія), що характеризує швидкість зростання кількості інформації і показує, як зростає інформація, необхідна для визначення місця розташування точки, що знаходиться на об'єкті дослідження, при прагненні розміру осередку до нуля; D_2 –кореляційна розмірність при $q = 2$, Що характеризує ймовірність знаходження в одному і тому ж осередку сітки двох точок що знаходяться на об'єкті спостереження; D_∞ –розмірність, що характеризує найбільш розріджений простір в об'єкті спостереження (світлі ділянки структури); $D_{-\infty}$ –розмірність, що характеризує найбільш концентрований простір (чорні ділянки структури).

При фрактальному аналізі завжди передбачається, що об'єкту, що вивчається, незалежно від масштабу його уявлення, властива властивість самоподібності, яка полягає в тому, що в будь-якому масштабі його структурі притаманні одні і ті ж геометричні особливості. Звісно, для реального природного фракталу, яким, безумовно, є структура багатьох металів, існує певний масштаб довжини l , такий, що з збільшенням трохи менших чи більших від цього масштабу властивість самоподібності пропадає. Тому властивість самоподібності природних фракталів розглядаються на масштабах.

$$l_{\min} \leq l \leq l_{\max} \quad (4.5)$$

На кожному масштабному рівні виявляються нові особливості структури матеріалу, що характеризують ту чи іншу його якість. Так, наприклад, у сталях на мікроструктурному рівні виявляються особливості зеренної структури, параметри якої значною мірою впливають на властивості міцності металу [13].

Таким чином, для вибору масштабу подання, наприклад елементів структури валкового чавуну або сталі, для визначення її фрактальної розмірності, необхідно визначити інтервал (4.5), в якому дотримується її самоподібність і на цьому інтервалі вибрати той єдиний масштаб, на якому обчислення фрактальної розмірності дасть найбільше Точний результат.

Для цього емпірично задається деякий крок Δl зміни масштабу від l_{\min} до l_{\max} . Потім в інтервалі (3) обчислюються оцінки фрактальних розмірностей у точках масштабів

$$l_{\min} + (l_{\min} + \Delta l) + (l_{\min} + 2\Delta l) + \dots + (l_{\min} + n\Delta l), \quad (4.6)$$

$$\text{де } n = \frac{l_{\max} - l_{\min}}{\Delta l}.$$

За оптимальний масштаб подання структури приймається той, при якому, як мінімум у двох точках, що стоять поруч, з ряду (4.6), фрактальні розмірності мінімально різняться між собою. Останнє пояснюється тим, що при цьому найкраще дотримується властивість самоподібності структури.

Нижче наведено приклад вибору масштабу представлення структури валків СПХН (рис. 5.9 а) та виконання СШХН (рис. 4.9 б) на інтервалі збільшення від $\times 100$ до $\times 1000$ із заданим кроком $\Delta l = 100$.

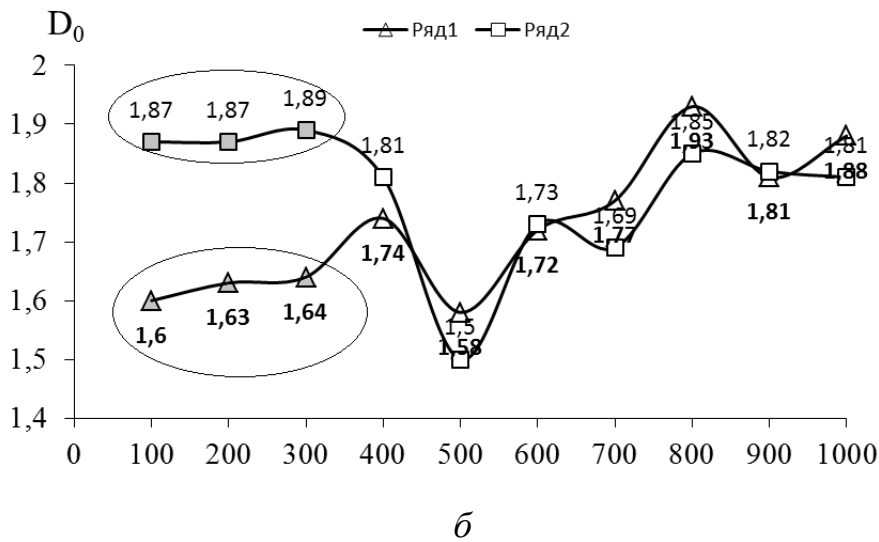
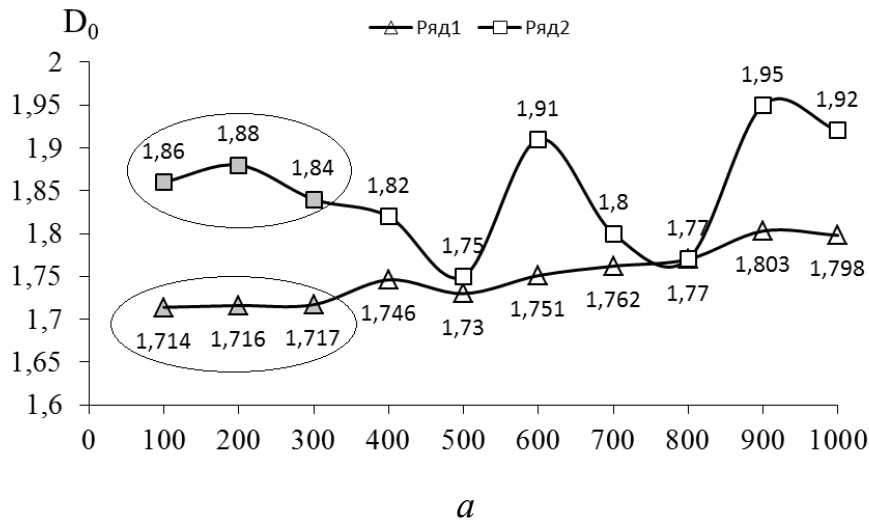


Рис. 4.9. Вибір оптимального масштабу уявлення структури чавуну (а - СПХН, б - СШХН) залежно від фрактальної розмірності її елементів (розмірності графіту - ряд 1 і карбідів - ряд 2)

З рис. 4.9 випливає, що самоподібність, як основна якісна характеристика, що підтверджує фрактальну природу досліджуваного об'єкта, у зазначеному інтервалі масштабів зберігається у виділених областях. На підставі результатів розрахунку фрактальної розмірності елементів структури чавунних валків виконання СПХН по 235 фотознімкам, за оптимальний масштаб представлення структури чавуну обрано масштаб

200, ×оскільки в двох масштабах, що стоять поруч (×100, ×300) фрактальні розмірності мінімально відрізнялися між собою: 1,714,... пластинчастого графіту (ряд 1); 1,860, ... 1,840 - для карбідів (ряд 2).

На рис. 4.9 б наведено результати вибору оптимального масштабу для представлення структури кулястого графіту валків виконання СШХН. В якості оптимального масштабу для представлення структури чавуну обраний також масштаб ×200. У діапазоні збільшення від ×100 до ×300 фрактальна розмірність графіту змінювалася від 1,600 до 1,640, а карбідів - від 1,870 до 1,890, що свідчить про збереження самоподібності елементів структури на даному їхню фрактальну природу.

Самоподібність структури перліту у вказаному діапазоні масштабів від ×100 до ×1000 досліджувалося окремо для пластин фериту та цементиту. Результати таких розрахунків наведено на рис. 4.10. В результаті проведених розрахунків за аналогічною схемою в якості оптимального масштабу подання структури перліту було обрано масштаб ×500 . Його вибір обумовлений тим, що оптимальні масштаби уявлення структурних складових перліту: фериту та цементиту мають близькі рівні ×500 і ×600 відповідно (рис. 4.10 а) та ×400 і ×500 відповідно (рис. 4.10 б) . При подальшому збільшенні структури перліту фрактальна розмірність його складових: фериту і цементиту починає різкіше змінюватися, що обумовлено збільшенням їх лінійних розмірів на фотознімках і, в першу чергу, товщини пластин. При збільшенні мікроскопа менше ×400 розрахунки фрактальної розмірності перлітних складових утруднені у зв'язку з недостатнім дозволом їх подання, що впливає на точність отриманих результатів.

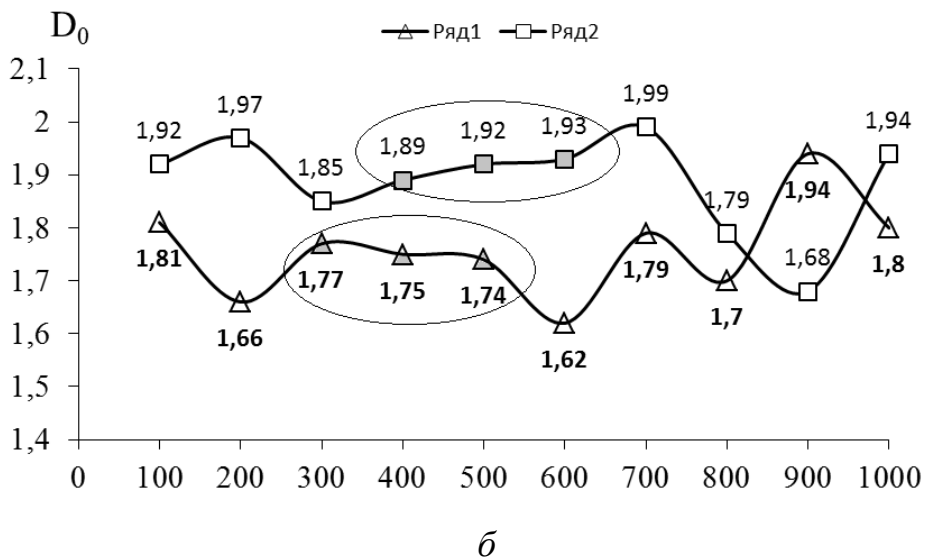
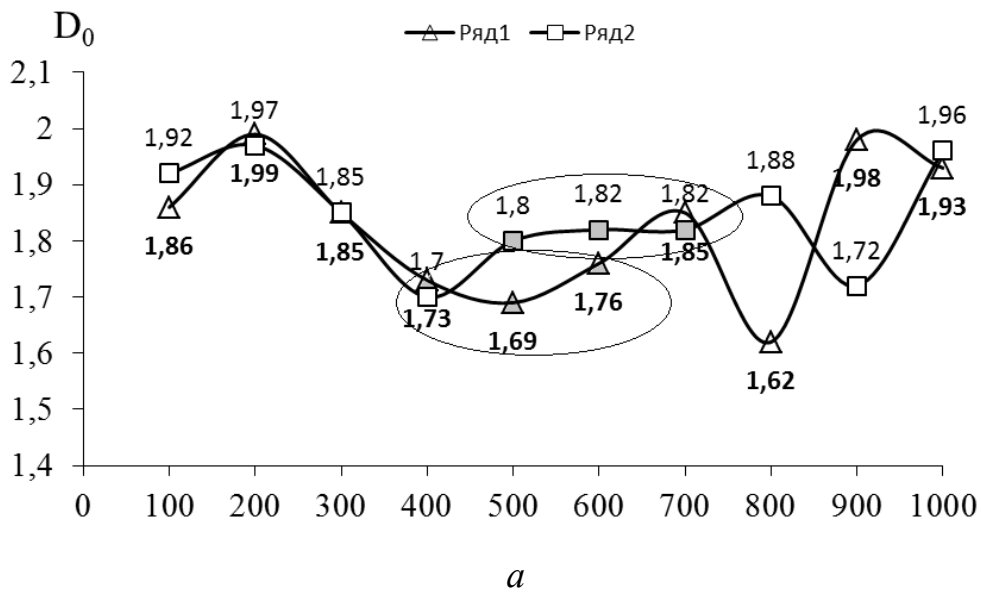


Рис. 4.10. Вибір оптимального масштабу уявлення структури перліту валкового чавуну (*a* - СПХН, *б* - СШХН) залежно від фрактальної розмірності її елементів (розмірність фериту представлена поряд 1; розмірність цементиту - поряд 2)

Аналогічні розрахунки щодо встановлення оптимального масштабу уявлення структури металу представлені у роботі [62]. У ній показано, що за оптимальний масштаб подання ферито-перлітної

структури маловуглецевої низьколегованої сталі СтЗпс в діапазоні збільшення від $\times 100$ до $\times 1000$ обраний масштаб $\times 550$.

Реалізація данного етапу досліджень дозволила визначити експериментальним шляхом оптимальний масштаб представлення структури валкового чугуна при збільшенні $\times 200$ – для мультифрактального аналізу її елементів: включень пластинчатого і сферичного графіта, карбидів, а також оптимальний масштаб представлення структури $\times 500$ – для мультифрактального аналізу структури пластинчатого перліта, що складається з ферриту і цементиту.

Алгоритм обчислення спектра розмірностей елементів структури із застосуванням програми "Мультифрактал", реалізованої на ЕОМ в програмному середовищі Delphi, вибрався наступний: всі зображення мікроструктури чавунних сортопрокатних валків розміром 10×15 см при збільшенні $\times 200$ і $\times 500$ переведені в електронний вигляд шляхом сканування фотознімків рази для якісного відображення рельєфу поверхні.

На рис. 4.11 наведено фотознімок фрагмента мікрошліфа металу, покритий квадратною сіткою в програмному режимі на персональному ЕОМ для розрахунку узагальненого спектра статистичних розмірностей елементів структури робочої зони металевої бочки чавунного валка виконання СПХН-45 за наведеною вище формулою (4.4).

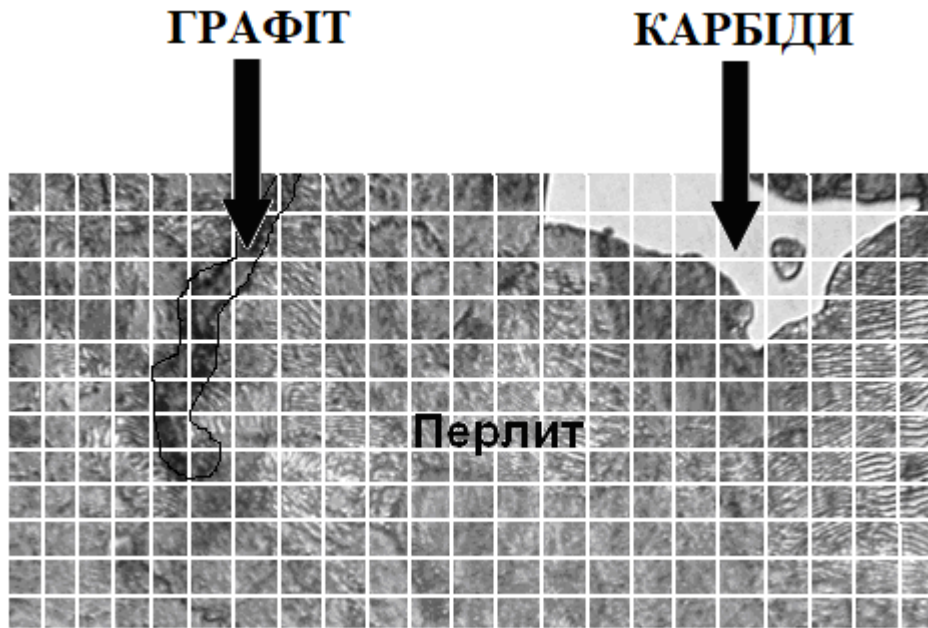


Рис. 4.11. До розрахунку спектра розмірностей елементів структури чавуну валкового (СПХН-45)

Для кожного зразка чавуну було отримано три фотознімки мікроструктури при збільшеннях $\times 200$ і $\times 500$ в п'яти довільно обраних полях на шліфі.

На наступному етапі обчислювалися п'ять основних розмірностей $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$ мультифрактального спектру для кожного елемента структури кожного фотознімка (рис. 4.12). В якості граничних значень $D_{-\infty}$ і D_∞ експериментальним шляхом вибиралися значення функції спектра в діапазоні від -200 до 200 .

При описі складної конфігурації елементів структури та форми досліджуваного металу, кількісна оцінка їх розмірності проводилася у встановленому масштабному діапазоні ($\times 100, \times 300$) – для пластинчастого та кулястого графіту, а також для карбідів у вигляді ледебуритної евтектики та в діапазоні збільшення ($\times 400, \times 600$) – для структурних складових перліту: фериту та цементиту, де показники двох

сусідніх розмірностей змінюються мінімально у досліджуваному масштабному діапазоні ($\times 100, \times 1000$).

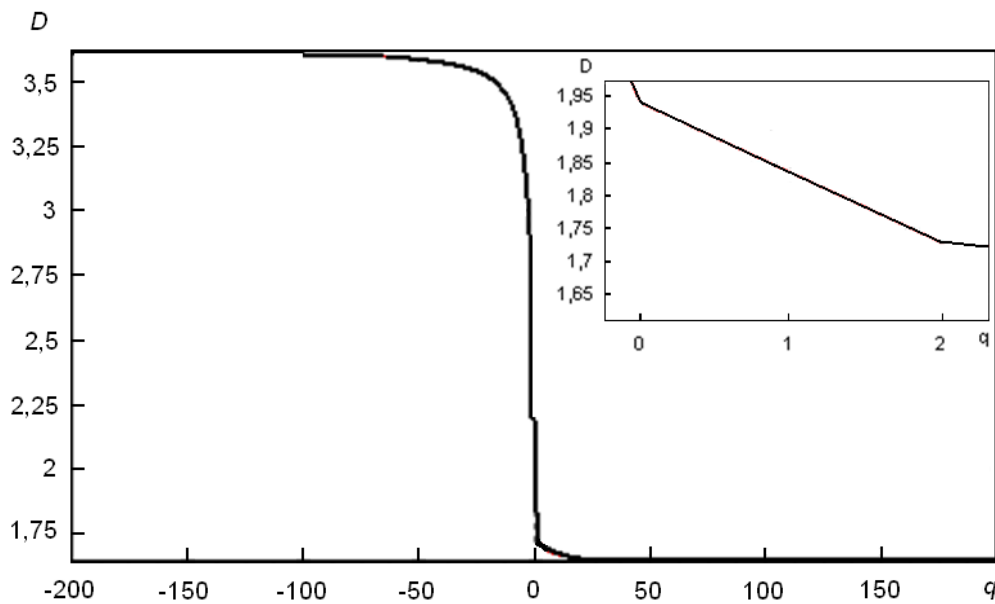
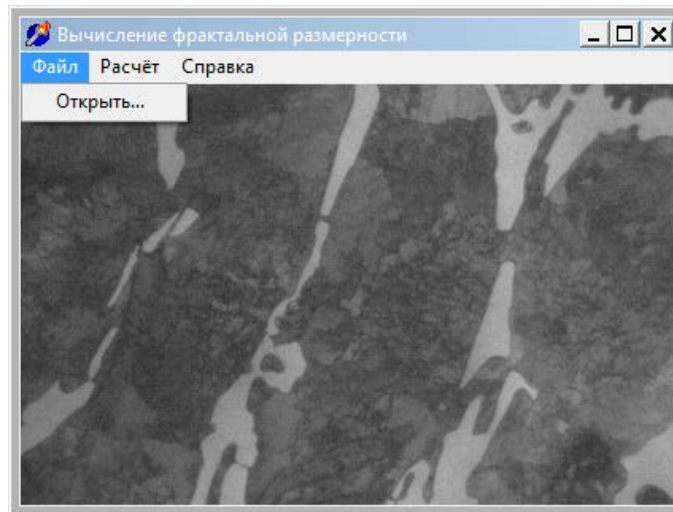


Рис. 4.12. Спектр розмірностей, обчислених для пластинчастого графіту валків СПХН-45: $D_0 = 1,94$; $D_1 = 1,84$; $D_2 = 1,73$; $D_{200} = 1,65$; $D_{-200} = 3,62$. У правому верхньому куті малюнка показано збільшену ділянку спектра розмірностей в інтервалі $0 < q < 2$

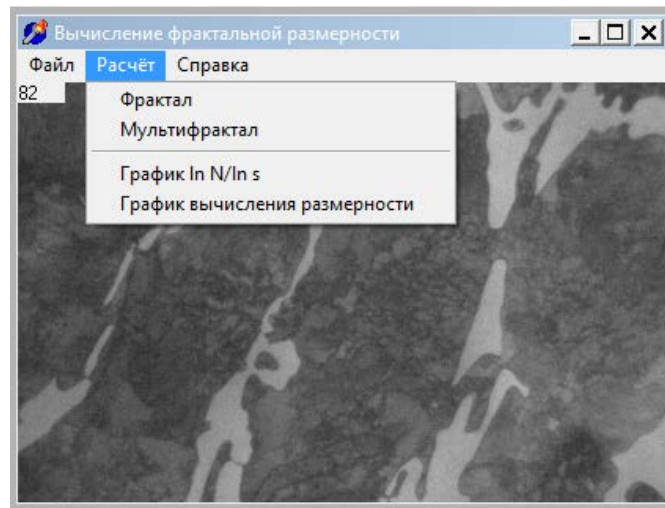
Встановлено, що фрактальна розмірність досліджуваних елементів структури змінювалася в межах похибки досвіду 5...7%, що свідчить про універсальність цієї оцінки, і, відповідно, надійність та економічний вигащ, з точки зору оснащення заводських лабораторій дорогими металографічними мікроскопами з більшою роздільною здатністю.

4.3. Програмна реалізація алгоритму

Програма “Мультифрактал” працює зі сканованими зображеннями у 256 градаціях сірого кольору. Після запуску програми здійснюється відкриття файлу: Файл \Rightarrow Відкрити (рис. 4.13 *a*):



a



б

Рис. 4.13. *a* - Меню програми: Файл \Rightarrow Відкрити зображення структури металу; *б* - Меню Розрахунок \Rightarrow Мультифрактал

Після завантаження зображення необхідно вибрати об'єкт на зображенні (структурну складову), для якого проводитиметься розрахунок спектра розмірності модифікованим способом та перераховані вище характеристики. Для цього в меню Робота необхідно вибрати команду Розрахунки (рис. 4.13 б). При цьому на екрані виникне панель для введення або коригування даних в залежності від кольору елементів структури однієї фази, розмірів клітин, що покривають фотознімок структури з заданим кроком, і межі обчислюваного діапазону змін спектра статистичних розмірностей мультифрактала (рис. 4.14).



Рис. 4.14. Панель для введення даних

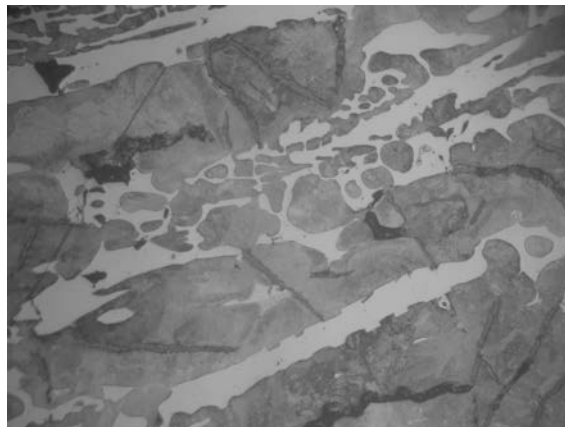
На рис. 4.14 графік статистики відтінків сірого є їх розподіл від 0 (чорний колір) до 255 (білий колір) залежно від кількості займаних ними пікселів зображення. Після цієї операції визначаються максимуми білого і чорного – градації кольору точок, що найчастіше зустрічаються, близькі до чорної і білої межі. Далі проводиться перетворення

зображення у двоколірне (чорно-біле), а градації сірого, що лежать нижче межі, що дорівнює половині суми білого і чорного максимумів перетворюються на чорний і білий колір. Програма автоматично робить вибір межі, що дорівнює половині суми білого та чорного максимумів, залежно від вибраного зображення. За рахунок автоматичного вибору межі розділу чорного та білого кольору підвищується точність результатів. Це тим, що кольоровість зображення мікроструктури безпосередньо залежить від вибору складу травника і часу витримки шліфу у ньому процесі травлення; витримки фотознімків структури в процесі їхнього прояву. При цьому найчастіше світлі включення структури можуть бути зараховані до темних і навпаки, що вносить істотну похибку при визначенні їх розмірних оцінок. Якщо необхідно обчислити розмірність окремого об'єкта зображення, то користувач за допомогою курсору визначає для нього межі кольоровості. Початкове значення довжини клітини та її кінцеве значення, що наводяться у пікселях, на наступних кроках задаються дослідником (рис. 4.14). Після цієї операції зображення, за потреби, може піддаватися фільтрації. Застосування фільтра дозволяє добитися видалення шумів поліграфічного друку.

Під час аналізу цифрових фотознімків мікроструктури було виявлено такі фрагменти, які мали дефекти полірування у вигляді “сміття” (плям та подряпин), розмиті та неконтрастні межі між світлими та темними ділянками елементів структури. З метою підвищення якості фотознімків мікроструктури їхню обробку проводили на основі вейвлет-аналізу [62].

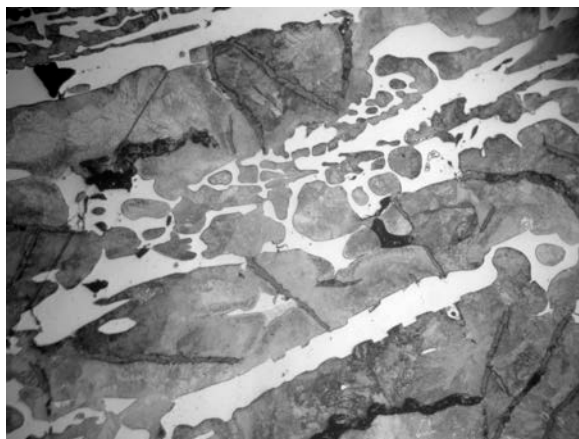
Алгоритми вейвлет-обробки зображення спираються відносно жорсткі критерії – обмежений набір рівнів розкладання ⁹, обмежений набір оптимальних вейвлет-баз і т.д. Це дозволило формалізувати процедуру вейвлет-обробки та звести до мінімуму помилку, що виникає внаслідок некоректно заданих параметрів обробки [306]. Обробку проводили локально за допомогою дискретного вейвлету Хаара другого порядку з гладкістю функції 5 [62], що дозволило при аналізі меж кольору елементів структури виявити контрастні межі між ними та усунути дефекти полірування.

На рис. 4.15 наведено приклад обраного фрагмента структури валкового чавуну до вейвлет-обробки з частково розмитими та за темненими межами між елементами структури та після обробки з контрастними межами.



a

⁹Насправді зазвичай розглядають $m=1$ (wave-вейвлет) і $m=2$ (mhat-вейвлет). Вищі похідні застосовуються рідко [306, 307].



б

Рис. 4.15. Збільшений фрагмент структури валкового чавуну з пластинчастою формою графіту до (а) і після вейвлет-обробки (б)

При натисканні кнопки Пуск на панелі введення даних проводиться розрахунок спектра статистичних розмірів зображення. На графіку рис. 4.16 наведено результати розрахунку спектра розмірності карбідів для чавунних валків виконання СПХН-45. По осі ординат відкладаються показники розмірних оцінок $D(q)$ елементів структури спектра, що обчислюється, а по осі абсцис - інтервал їх змін. У разі зміни показника q задавалися не більше від -200 до 200 .

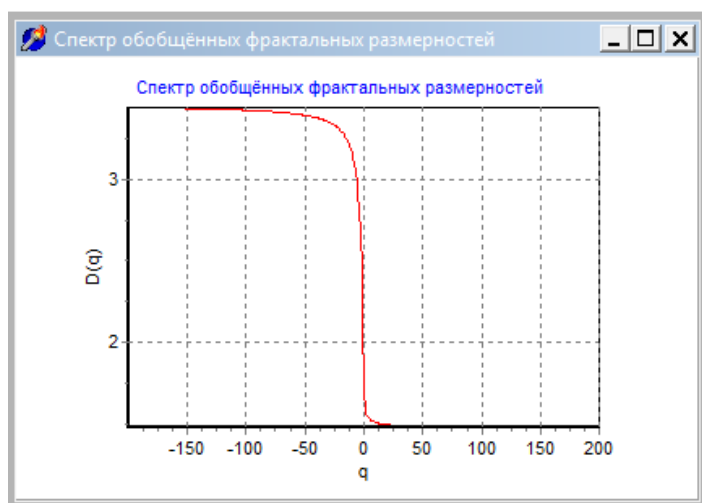


Рис. 4.16. Результати обчислення спектра розмірностей карбідної складової

При цьому розрахункова частина програми "Мультифрактал" вважається закінченою. Більш детальну інформацію можна знайти в меню Довідка \Rightarrow Допомога.

4.4. Чутливість характеристик якості цільового продукту до змін вхідних параметрів

Останнім часом у багатьох статтях, присвячених питанням матеріалознавства, наводяться приклади об'єктів, для опису яких використовується мова фрактальної геометрії. Однак застосування такого підходу має бути суворо обґрунтовано, оскільки воно має базуватися на впевненості в тому, що саме фрактальна розмірність, властива досліджуваному матеріалу, може характеризувати його якісні властивості. До цього часу цю проблему пропонувалося вирішувати з допомогою критерію Ф. Такенса. Виконання умов, що задовольняють даному критерію, зводяться до вимірювання будь-якої однієї характеристики системи, що вивчається, в різні моменти часу з інтервалом Δt . У цих вимірів виходить деяка обмежена послідовність $\{a_i\}$, $0 \leq i < \infty$. Якщо цієї послідовності вдається побудувати гладку детерміновану модель виду $\frac{d\bar{x}}{dt} = \vec{f}(\bar{x})$, ми маємо справу зі складним детермінованим процесом і застосовувати мову фрактальної геометрії безглуздо. Але, по-перше, ми не завжди можемо експериментально отримати таку послідовність, а по-друге, оскільки ми завжди маємо справу з вибіркою кінцевої довжини, оскільки природно виникає питання про те, яким має бути число N , щоб можна було надійно визначити кореляційний показник? Як бачимо, проблема не така проста, як це

здається з першого погляду. На наш погляд, на початку дослідження, повинна бути показана чутливість фрактальної розмірності матеріалу до тих його характеристик, на ідентифікацію яких вони спрямовані. Останнє пояснюється тим, що фрактальна розмірність притаманна досліджуваному матеріалу може змінюватися в дуже вузькому діапазоні і у зв'язку може бути нечутливою (мало чутливою) до зміни тих характеристик матеріалу ідентифікація яких виробляється.

Підхід, заснований на застосуванні мультифрактальної теорії для кількісної оцінки структури, дозволяє шляхом зіставлення спектра статистичних розмірностей її елементів, визначати чутливі показники якісних характеристик, зокрема механічних властивостей, описуючи взаємно однозначну відповідність даних розмірностей структури та цих властивостей. Це, у свою чергу, призведе до зменшення неповноти формальної аксіоматики, що виникає при описі елементів структури металу за допомогою традиційних фігур геометрії Евкліда шляхом виявлення структурно-чутливих розмірних оцінок критеріїв якості.

Для вирішення цього завдання пропонується запровадити критерій– K , що відображає чутливість деякої розмірності елементів структури мультифрактального спектру статистичних розмірностей до змін досліджуваних характеристик матеріалу [115]. Нехай X_1, X_2 – два числа, що характеризують деяку якість матеріалу з безлічі його значень, і нехай Y_1, Y_2 – відповідні їм чисельні значення розмірних оцінок, отриманих на підставі вивчення певної галузі $i = 1, \dots, n$ цього матеріалу. Визначимо як позначається відмінність між показниками X_1 та X_2 на відмінність між Y_1 і Y_2 . Оскільки X і Y – числа, то міру можна прийняти $|X_1 - X_2|$ і відповідно $|Y_1 - Y_2|$. Так, наприклад, для завдань матеріалознавства зручно вивчати чутливість фрактальної чи

будь-якої іншої розмірності елементів структури матеріалів до змін їх якісних характеристик, обчислюючи коефіцієнт чутливості K_i (4.7) за запропонованою В.І. Большаковим та Ю.І. Дубровим методиці [115]:

$$K_i = |Y_i - Y_{i+1}| / |X_i - X_{i+1}|, \quad (4.7)$$

Для виділення корисного сигналу на тлі перешкод природно отримані точкові значення чутливості фрактальної або статистичної розмірності порівнювалися з похибкою— ψ методики:

$$\forall K_i \gg \psi, \quad i = 1, \dots, n \quad (4.8)$$

У цьому, якщо умова (4.8) порушується, тобто. Коли

$$\exists [(K_j \approx \psi) \cup (K_j \leq \psi)] \in K_i, \quad (4.9)$$

то приймається, що з кожної $j \in i$ - областей, розмірність Y_j не корелирована з досліджуваними характеристиками матеріалу і застосування методики мультифрактального аналізу структури матеріалу, наприклад прогнозу його якісних характеристик, некоректно. Чутливість буде максимальною у тих точках структури шліфу, де спостерігається максимальна зміна властивостей металу. У роботі [103] показано, що чутливість спектра розмірностей елементів ферито-перлітної структури маловуглецевої сталі досить висока і цей факт можна використовувати при ідентифікації, наприклад, її механічних властивостей, зокрема щодо показників твердості непрямым шляхом.

Для мінімізації витрат пропонується експерименти розбити, на них на два етапи.

1. Перший попередній етап повинен включати визначення чутливості критеріїв якості до розмірних оцінок елементів структури матеріалу, що вивчається, $D_0, D_1, D_2, D_{200}, D_{-200}$ з обчисленого загального спектра статистичних розмірностей шляхом проведення прямих експериментів або статистичних даних, отриманих на підприємстві або з літературних джерел ¹⁰.

2. Другий етап експерименту, спрямований на прогноз критеріїв якості валків виконання СПХН та СШХН, здійснюється тоді і лише тоді, коли на першому етапі підтверджено чутливість розмірних характеристик виконанням умови (4.7) або винятком із аналізу областей, що характеризуються умовою (4.9).

На рис. 4.17 –рис. 4.22 наведено результати розрахунку коефіцієнтів чутливості K_i механічних властивостей валкового чавуну з пластинчастою формою графіту до розмірних оцінок $D_0, D_1, D_2, D_{200}, D_{-200}$ графіту, карбідів та перліту (ферит+цементит), обчислених за формулою (4.7).

¹⁰У предметній області, що вивчається, накопичено величезну кількість опублікованих експериментальних даних, що включають фотографії шліфів, на підставі аналізу яких, з досить високою достовірністю, можна визначити величину розмірності і провести попередню оцінку її чутливості до змін якісних характеристик матеріалу, що вивчається.

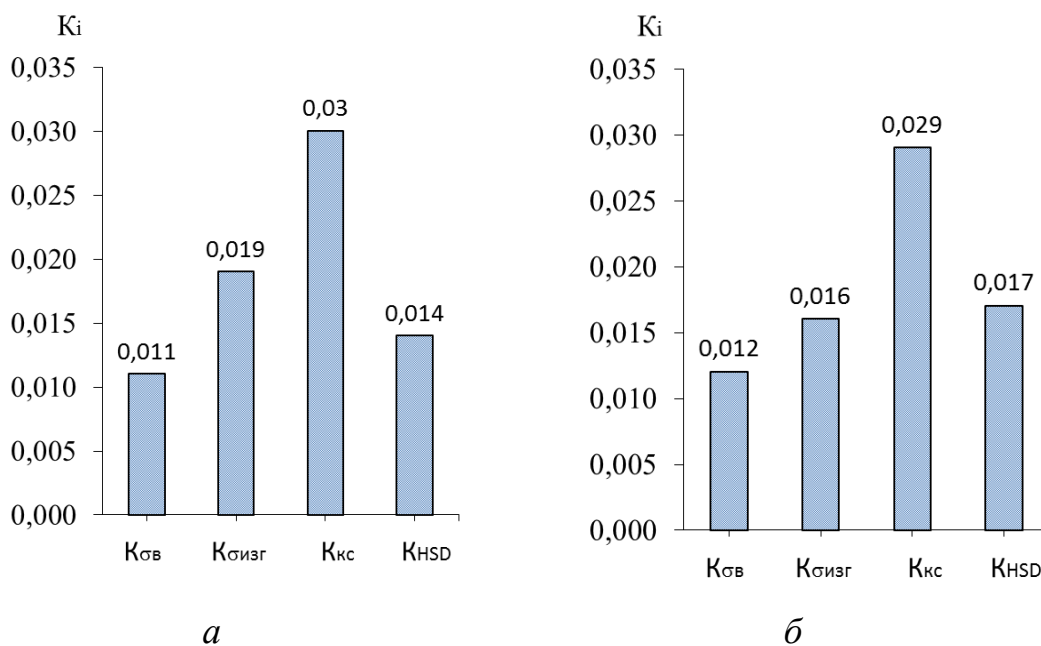
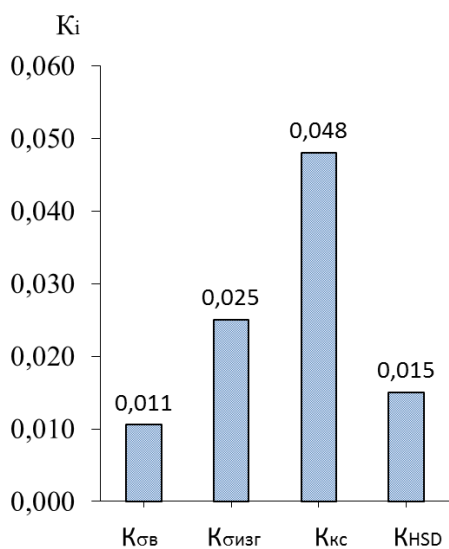
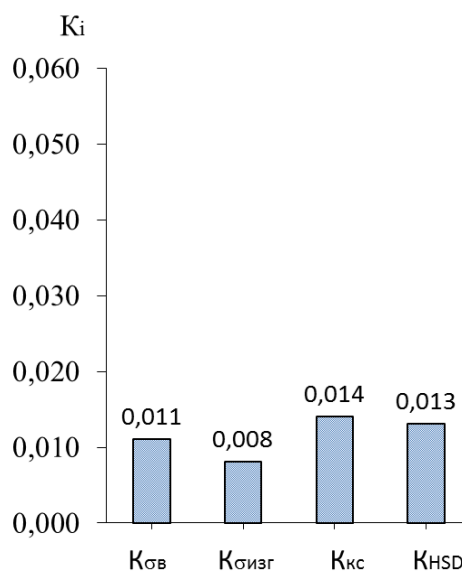


Рис. 4.17. Чутливість механічних властивостей до фрактальної (*а*) та інформаційної (*б*) розмірності графіту робочої зони бочок валків виконання СПХН

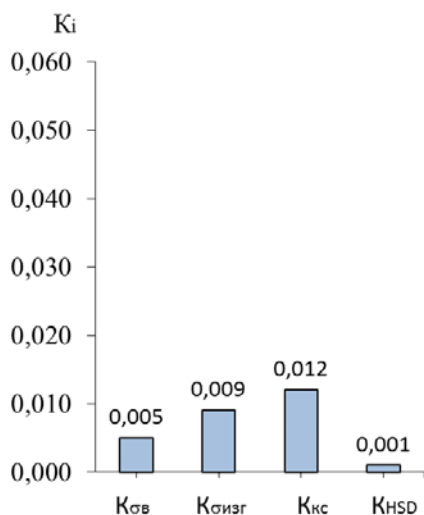
Коефіцієнти чутливості фрактальної (0,011...0,030), інформаційної (0,012...0,029) та кореляційної (0,011...0,048) розмірностей пластинчастого графіту (рис. 4.17 та рис. 4.18) перевищують у 2-3 рази K_{D+200} (0,008...0,014) та K_{D-200} (0,001...0,012) з мультифрактального спектра узагальнених статистичних розмірностей Реньї. Тому, для подальшого використання розмірних оцінок графіту при прогнозі механічних властивостей валкового чавуну визначено його найбільш чутливі розмірності D_0, D_1, D_2 , а граничні розмірності D_{200}, D_{-200} через їх незначні показники чутливості в подальших розрахунках якості не враховувалися.



a



б



в

Рис. 4.18. Чутливість механічних властивостей до кореляційної розмірності (*a*), розмірності D_{+200} (*б*) та розмірності D_{-200} (*в*) графіту робочої зони бочок валків виконання СПХН

В результаті експерименту встановлено, що найкраща серед аналізованих чутливість механічних властивостей до розмірних характеристик у карбідів, спостерігається до фрактальної, інформаційної та кореляційної розмірності (рис. 4.19, рис. 4.20). Тому ці розмірнісні оцінки карбідів D_0, D_1, D_2 доцільно використовувати надалі для прогнозу механічних властивостей робочої зони чавуну з пластинчастою формою графіту.

Низькі показники чутливості властивостей до розмірних оцінок D_{200} , D_{-200} елементів структури, що характеризує розмірність найбільш світлих і темних ділянок досліджуваного об'єкта на шліфі відповідно, в масштабному діапазоні ($100 \times$, $\times 1000$), як показали результати експерименту, непридатні для прогнозу наступних механічних характеристик чавуну валкового : σ $\sigma_{\text{изг}}$, КС та НSD . Коефіцієнти чутливості механічних властивостей до статистичної розмірності D_{200} карбідів, обчисленої за формулою (4.4), не перевищують 0,02 (рис. 4.20 б), а до розмірності D_{-200} –не перевищують 0,016, що недостатньо при використанні цих розмірних оцінок в практичних цілях для прогнозу критеріїв якості сортопрокатних чавунних валків виконання СПХН і СШХН.

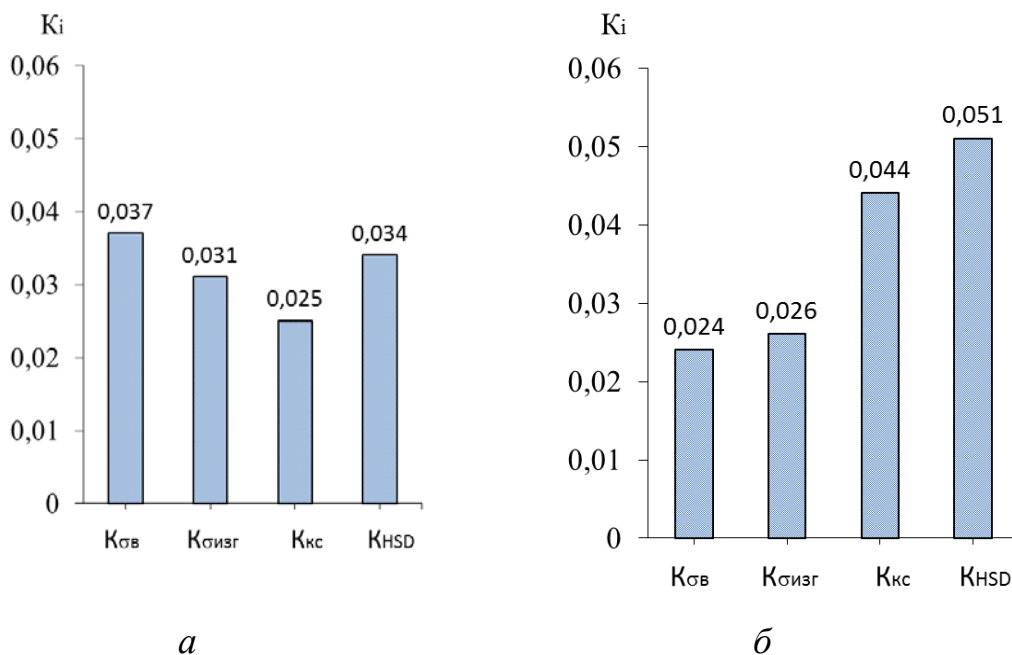


Рис. 4.19. Чутливість механічних властивостей до фрактальної (а) та інформаційної (б) розмірності карбідів робочої зони бочок валків виконання СПХН

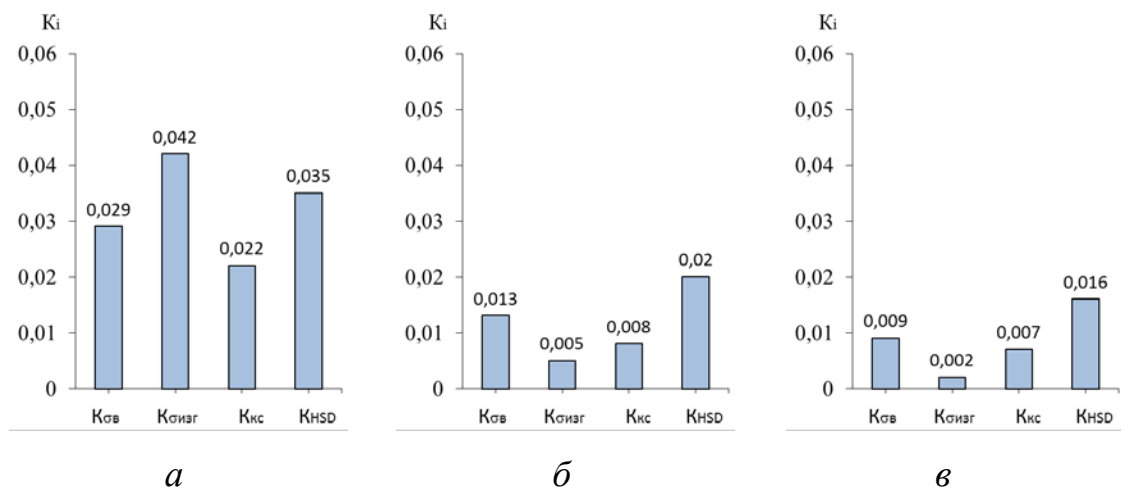


Рис. 4.20. Чутливість механічних властивостей до кореляційної розмірності (*a*), розмірності D_{+200} (*б*) та розмірності D_{-200} (*в*) карбідів робочої зони бочок валків виконання СПХН

При аналізі результатів розрахунку показників чутливості аналізованих характеристик якості чавуну до розмірних характеристик структурних складових перліту (фериту та цементиту), наведених на графіках рис. 4.21 та рис. 4.22, спостерігаються відносно низькі коефіцієнти чутливості властивостей до всіх статистичних розмірностей з спектра, що розглядається. Середній показник коефіцієнтів чутливості механічних властивостей до фрактальної розмірності D_0 перліту (ферит+цементит) становить $0,006 \pm 0,003$; $0,008 \pm 0,004$ – до інформаційної розмірності D_1 ; $0,005 \pm 0,003$ – до кореляційної розмірності D_2 ; $0,005 \pm 0,003$ – до розмірності D_{+200} та $0,007 \pm 0,004$ – до розмірності D_{-200} низький, що свідчить про неефективність практичного використання даних оцінок для прогнозу критеріїв якості робочої зони чавунних валків виконання СПХН.

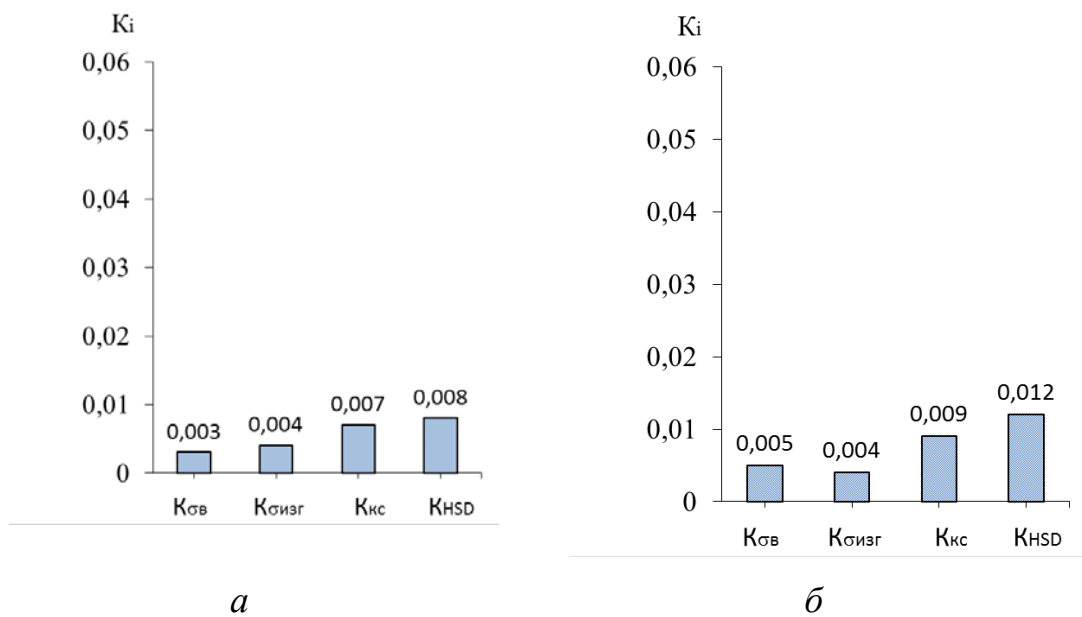


Рис. 4.21. Чутливість механічних властивостей до фрактальної (а) та інформаційної (б) розмірності перліту (ферит+цементит) робочої зони бочок валків виконання СПХН

На підставі проведеного експерименту щодо виявлення чутливості механічних властивостей робочої зони бочок чавунних прокатних валків виконання СПХН до статистичних узагальнених розмірностей елементів структури з досліджуваного мультифрактального спектру $D_0, D_1, D_2, D_{200}, D_{-200}$ зроблено такі висновки:

1. Для прогнозу механічних властивостей валкового чавуну з пластинчастою формою графіту доцільно використовувати розмірні оцінки D_0, D_1, D_2 графіту та карбідів зі збільшенням $\times 200$.
2. Встановлено низьку чутливість між механічними властивостями та розмірними оцінками структури перліту (фериту та цементиту), що не дозволяє їх використовувати в практичних цілях для прогнозу якості валків. Очевидно, цей факт пов'язаний з деякими геометричними особливостями елементів перлітної структури (роз-

мірами, дисперсністю, ступенем звивистості меж окремих її елементів). Для встановлення більш високої чутливості між даними характеристиками необхідно провести пошук такого масштабного рівня подання структури чавуну валкового, який дозволить виявити дані особливості перлітної матриці. Однак це є окремим прикладним завданням, яке в рамках даної роботи не розглядалося.

3. Розмірнісні оцінки перліту, графіту та карбідів D_{200} , D_{-200} , через їх низьку чутливість до механічних властивостей, застосовувати для їх прогнозу в дослідженому масштабному діапазоні подання структури ($\times 100$, $\times 1000$) некоректно.

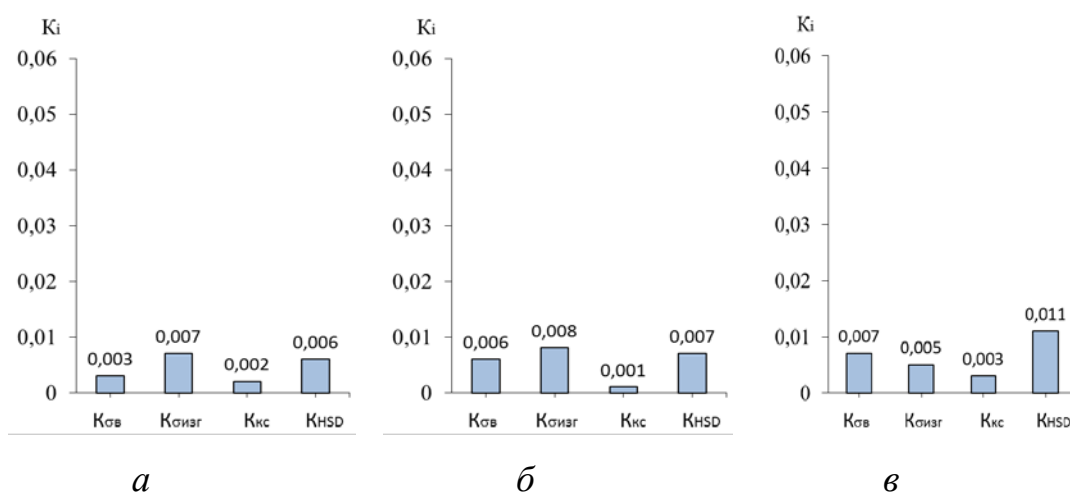


Рис. 4.22. Чутливість механічних властивостей до кореляційної розмірності (а), розмірності D_{+200} (б) та D_{-200} (в) перліту (ферит+цементит) робочої зони бочок валків виконання СПХН

Для валків виконання СПХН також спостерігається чутливість механічних властивостей до фрактальної, інформаційної та кореляційної розмірності кулястого графіту та карбідів при фіксованому збільшенні структури $\times 200$ (рис. 4.23 –рис. 4.26). Показники чутли-

вості механічних властивостей валкового чавуну до розмірності оцінок елементів структури D_0, D_1, D_2 в 3-5 разів перевищують показники чутливості до граничних розмірностей із спектра D_{200}, D_{-200} . Як випливає з рис. 4.23 *а* найбільша серед аналізованих чутливість механічних властивостей робочої зони бочок валків виконання СШХН до фрактальної розмірності графіту спостерігається для твердості 0,61, а найменша – для межі міцності на розрив 0,007. Це, мабуть, свідчить про вплив форми графіту на ці критерії якості.

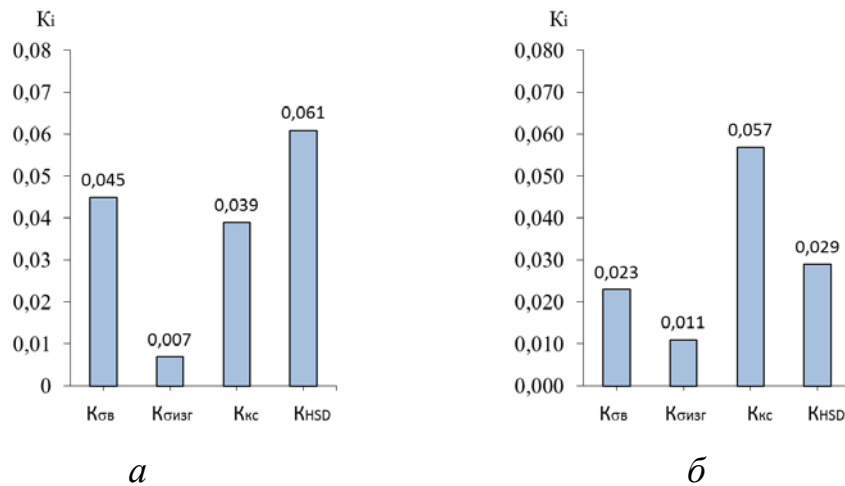


Рис. 4.23. Чутливість механічних властивостей до фрактальної (*а*) та інформаційної (*б*) розмірності графіту робочої зони бочок валків виконання СШХН

Визначено максимальний показник чутливості ударної в'язкості до інформаційної розмірності кулястого графіту (рис. 4.23 *б*), розрахункове значення якого становить 0,057. Відносно низькі значення коефіцієнтів чутливості механічних властивостей, що розглядаються, виявлені до статистичних розмірностей із спектру Реньї D_{200}, D_{-200} (рис. 4.24 *б, в*), які знаходяться в межах 0,003...0,021 і 0,006...0,017 відповідно.

Для карбідів (рис. 4.24 б, в), кулястого графіту (рис. 4.25 а, б) та структурних складових перліту (рис. 4.26 б, в) у всіх розглянутих випадках низькі показники чутливості механічних властивостей до розмірних характеристик D_{200}, D_{-200} свідчать про низьку ефективність їх подальшого використання рівняннях прогнозу якості валкового чавуну проти іншими розмірностями D_0, D_1, D_2 , обчисленими з спектра Ренъи. Дані розмірні оцінки елементів структури сортопрокатних чавунних валків виконання СШХН, можливо, можуть корелювати з іншими характеристиками якості чавуну валкового, що вимагає окремих досліджень і не розглядається в межах даної роботи.

до кореляційної розмірності графіту робочої зони бочок валків виконання СШХН (рис. 4.24 а) перевищують у два і більше разів показники чутливості розмірних характеристик D_{+200} і D_{-200} , що надає можливість подальшого пошуку кореляції D_2 показниками якостей валкового чавуну

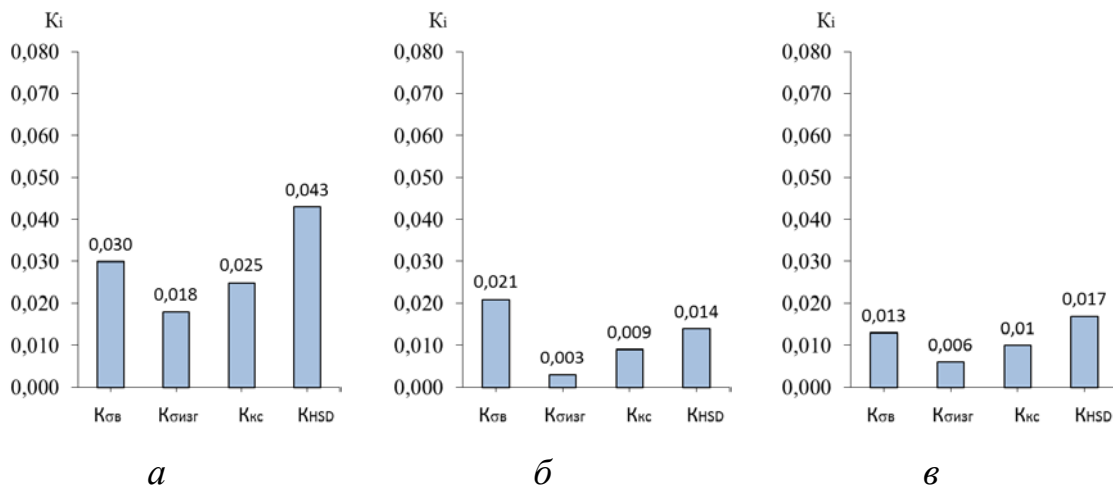


Рис. 4.24. Чутливість механічних властивостей до кореляційної розмірності (а), розмірності D_{+200} (б) та розмірності D_{-200} (в) графіту робочої зони бочок валків виконання СШХН

Для чавуну з кулястою формою графіту найкращі показники чутливості виявлені у межі міцності на вигин 0,08 та ударної в'язкості 0,067 (рис. 4.25 а) до фрактальної розмірності карбідів; межі міцності на вигин 0,062 та твердості 0,041 до їх інформаційної розмірності (рис. 4.25 б), ударної в'язкості 0,071 до кореляційної розмірності (рис. 4.25 в), що свідчить про можливу кореляцію між цими характеристиками.

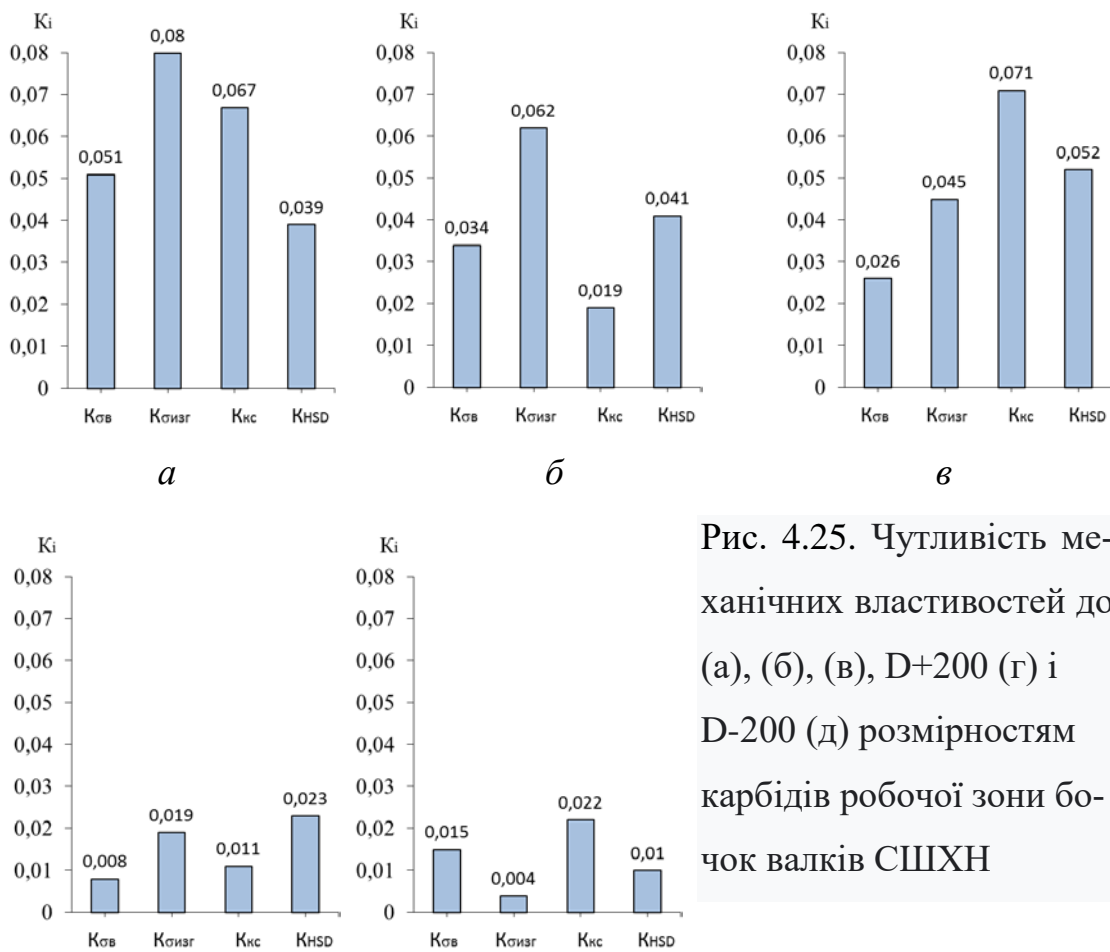


Рис. 4.25. Чутливість механічних властивостей до (а), (б), (в), D+200 (г) і D-200 (д) розмірностям карбідів робочої зони бочок валків СШХН

Показники чутливості $\sigma_{в}$, $\sigma_{изг}$, КС та HSD до розмірних оцінок структурних складових перліту відносно низькі порівняно з розмірними оцінками графіту та карбідів, що свідчить про низьку кореляцію між даними характеристиками (рис. 4.26).

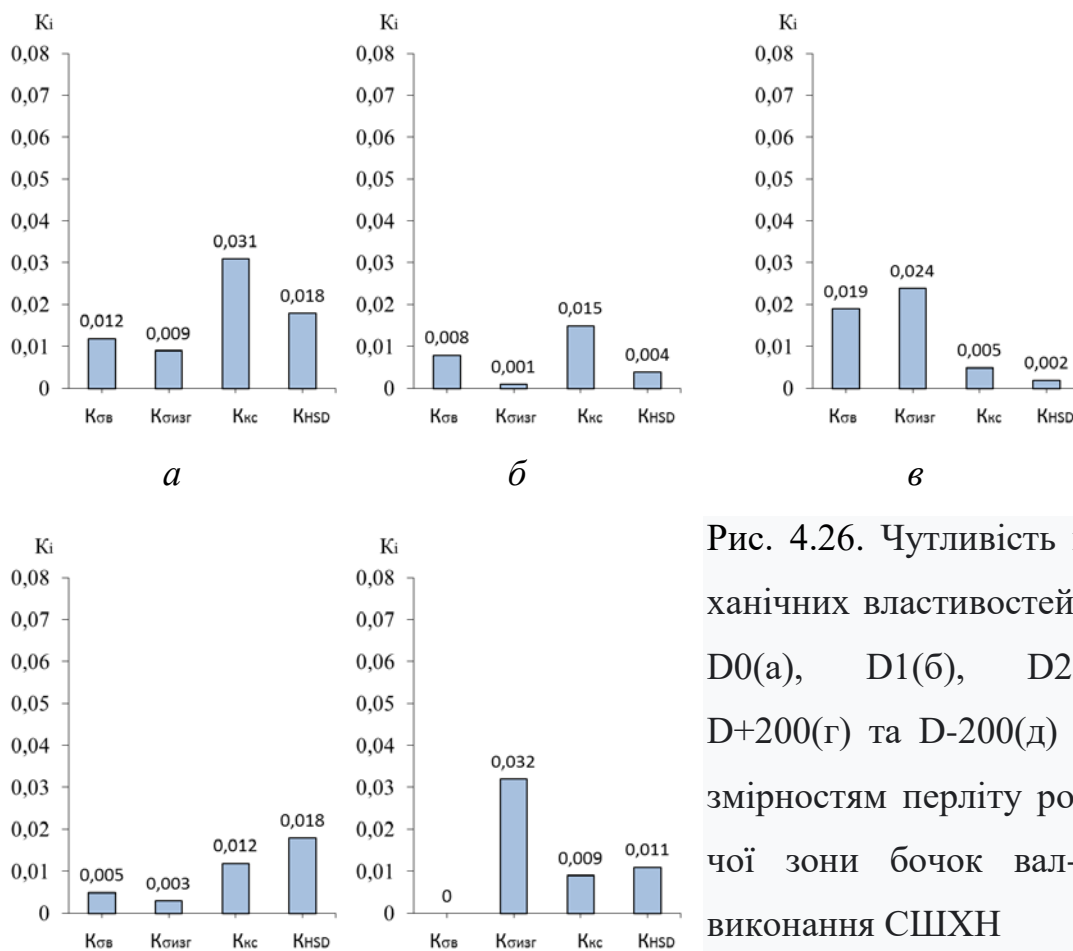


Рис. 4.26. Чутливість механічних властивостей до D0(а), D1(б), D2(в), D+200(г) та D-200(д) розмірностей перліту робочої зони бочок вал-ків виконання СШХН

4.5 Встановлення взаємно однозначної відповідності між характеристиками якості та вхідними параметрами

При зіставленні оцінок розмірності елементів структури валкового матеріалу (графіту і карбідів) з його механічними властивостями отримані рівняння та коефіцієнти, що відображають їх адекватність (рис. 4.27-4.30). Графіки, що описують вплив статистичних розмірностей структурних складових валкового чавуну з його механічні вла-

стивості, отримані виходячи з встановлення чутливості (4.7) між цими характеристиками. Нижче наведені ті залежності, де шляхом порівняння отриманих результатів було виявлено найбільш чутливі один до одного статистичні характеристики і механічні властивості.

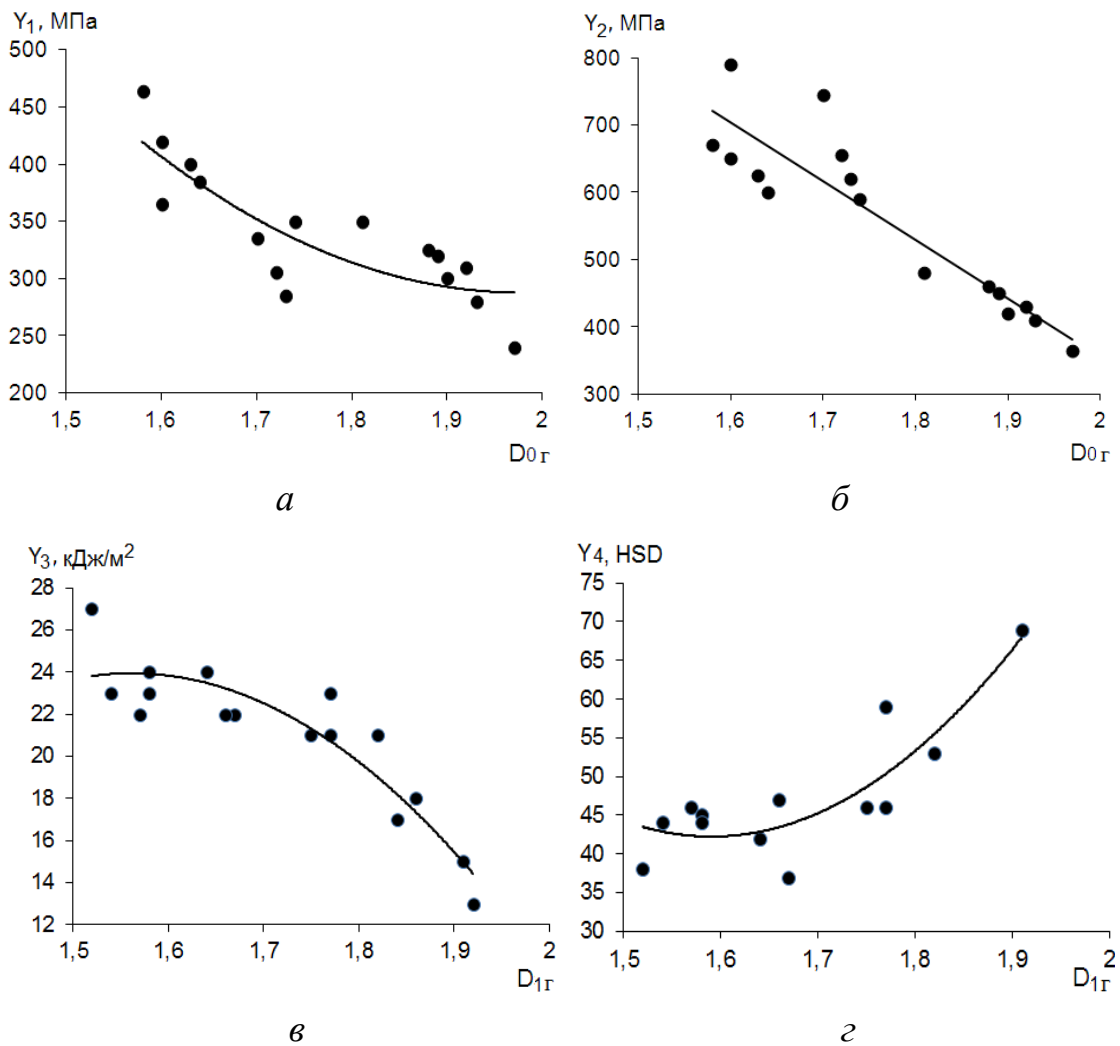


Рис. 4.27. Залежність межі міцності на розрив $-Y_1$ межі міцності на вигин $-Y_2$ від фрактальної розмірності пластинчастого графіту (а, б), ударної в'язкості $-Y_3$ твердості $-Y_4$ від інформаційної розмірності пластинчастого графіту (в, г) валків СПХН

$$Y_1 = 834,03 \cdot D_{0Г}^2 - 3299,1 \cdot D_{0Г} + 3550, \quad R^2 = 0,70 \quad (4.10)$$

$$Y_2 = -874,36 \cdot D_{0\Gamma} + 2103,2, \quad R^2 = 0,83 \quad (4.11)$$

$$Y_3 = -74,075 \cdot D_{1\Gamma}^2 + 231,39 \cdot D_{1\Gamma} - 156,76, \quad R^2 = 0,84 \quad (4.12)$$

$$Y_4 = 252,22 \cdot D_{1\Gamma}^2 - 802,42 \cdot D_{1\Gamma} + 680,43. \quad R^2 = 0,75 \quad (4.13)$$

Встановлені залежності дозволяють оцінювати ступінь впливу структури чавуну з його механічні властивості. Межі включень пластинчастого графіту служать концентраторами мікронапруг, а збільшення його вмісту послаблює металеву матрицю чавуну, що свідчить про вплив на механічні властивості чавуну як змісту, розмірів та розподілу графіту, так і форми включень. Відповідно до К.Л. Ващенко та Л. Софроні [264], при цій формі графіту ефективно використовується лише 30...50% міцності металевої основи чавуну та практично відсутня можливість використання її пластичних властивостей. Аналіз спектра статистичних узагальнених розмірностей валкового чавуну показав, що фрактальна розмірність досліджуваної фази більшою мірою залежить від форми та геометричних розмірів її елементів, а інформаційна та кореляційна розмірності залежать, в основному, від їхнього змісту та розподілу.

Спостерігається тенденція зменшення характеристик міцності сортопрокатних чавунних валків зі збільшенням фрактальної розмірності пластинчастого графіту (рис. 4.27 *а, б* рівняння (4.10, 4.11), що описують наведені залежності). Це певним чином зумовлено збільшенням його вмісту в чавуні від 0,5 до 2,5% та зростанням довжини включень – від ПГд45 до ПГд180, а також підвищенням вмісту нікелю з 0,99 до 1,17% за масою. Застосування традиційних методів ба-

лової оцінки геометричних характеристик пластинчастого графіту відповідно до ГОСТ 3443 дозволило для досліджуваних виконань сортопрокатних валків зафіксувати зміну його форми відносно вузьких межах –ПГф1, ПГф2; розмірів –ПГД45-ПГД180; розподілу –ПГр1, ПГр2 та займаній площі –ПГ2 та ПГ4, що не дає можливості за цими даними оцінювати з необхідною для практичних цілей точністю характеристики якості. Зафіксовано зменшення показників ударної в'язкості зі збільшенням інформаційної розмірності пластинчастого графіту (рис. 4.27 *а*) і одночасне підвищення твердості (рис. 4.27 *б*), залежності яких описуються поліномом другого ступеня (4.12, 4.13). Низькі показники твердості HSD 36...46 (рис. 4.27 *б*) спостерігаються в діапазоні інформаційної розмірності графіту 1,52...1,68 і, крім того, частково зумовлені нерівномірним розподілом включень графіту, який описується балом ПГр2, а також низьким вмістом ледебуриту на рівні 8 ... 14%. Отримані результати свідчать про більший вплив на показники ударної в'язкості та твердості розподілу графітних включень, ніж їх форми.

Карбіди (цементит і ледебурит) кристалізуються в основному в поверхневих шарах валків при інтенсивному відведенні тепла від рідкого чавуну, який заливається у форму, і мають високу твердість по Шору в межах 80...100 одиниць. Однак їх високий вміст у робочому шарі валків одночасно підвищує його крихкість. Вплив складної геометричної конфігурації карбідів на фізико-хімічні властивості валкового матеріалу до кінця не досліджено, але отримані на рис. 4.28 *а* - *б* свідчать, що такий зв'язок існує. Підвищення межі міцності на розрив (рис. 4.28 *а*, (4.14)) зафіксовано при зростанні фрактальної розмірності ледебуриту до 1,99, а на вигин (рис. 4.28 *б*, (4.15)) – при зростанні його інформаційної розмірності до 1,98, коли займані ним

показники площі становлять 20...35%. При зменшенні кореляційної розмірності ледебуриту з 1,86 до 1,58 зафіксовано зростання вдвічі твердості робочої зони металевих бочок сортопрокатних валків з HSD 37 до 70 (рис. 4.28 *з*, (4.17)) та одночасне зниження показників ударної в'язкості з 2 м^2 (рис. 4.28 *в*, (4.16)), що частково зумовлено збільшенням вмісту ледебуриту з 8 до 35% та вуглецю з 2,84 до 3,32%.

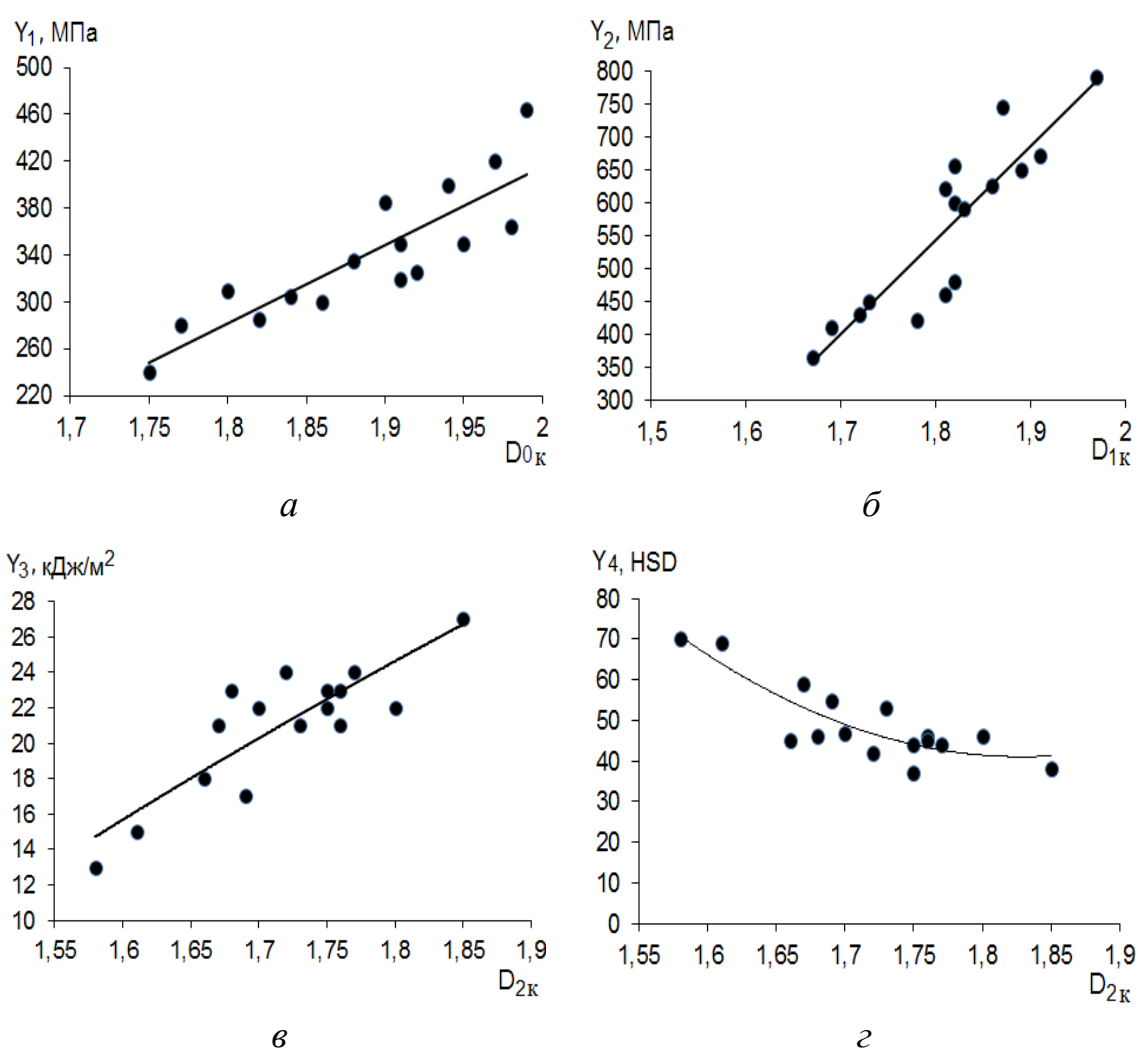


Рис. 4.28. Залежність Y_1 від фрактальної розмірності карбідів (*а*), Y_2 від інформаційної розмірності карбідів (*б*), Y_3 та Y_4 від кореляційної розмірності карбідів (*в*, *з*) валків СПХН

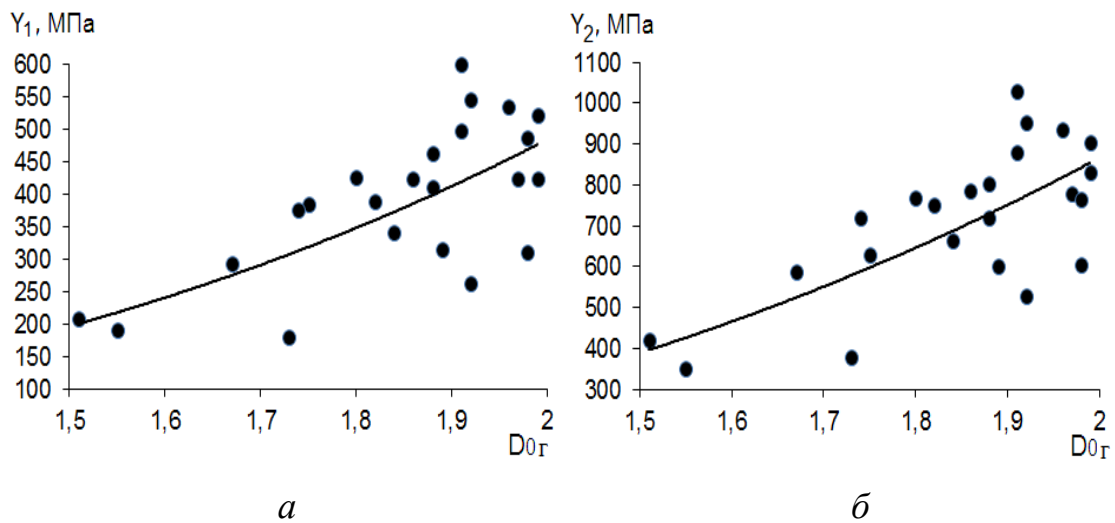
$$Y_1 = 667,89 \cdot D_{0\text{до}} - 918,72, \quad R^2 = 0,75 \quad (4.14)$$

$$Y_2 = 1432,20 \cdot D_{1\text{до}} - 2035,90, \quad R^2 = 0,80 \quad (4.15)$$

$$Y_3 = 75,89 \cdot \ln(D_{2\text{к}}) - 19,989, \quad R^2 = 0,73 \quad (4.16)$$

$$Y_4 = 478,35 \cdot D_{2\text{к}}^2 - 1749,8 \cdot D_{2\text{до}} + 1641,2. \quad R^2 = 0,72 \quad (4.17)$$

Встановлено також ряд залежностей структури та властивостей для валкового чавуну з кулястою формою графіту. Для валків виконання СШХН зі структурою кулястого графіту, виходячи з аналізу графіків, наведених на рис. 4.29 а-в, збільшення показників якісних характеристик валкового чавуну відбувається за статечним законом.



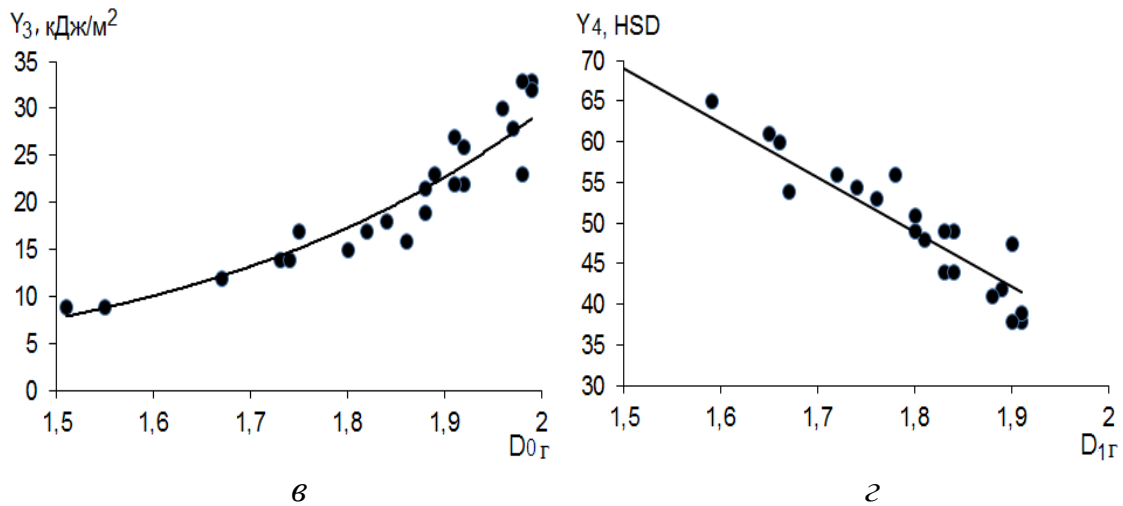


Рис. 4.29. Залежність Y_1 , Y_2 , Y_3 від фрактальної розмірності кулястого графіту (а, б, в) та Y_4 від інформаційної розмірності кулястого графіту (з) валків СШХН

Показники $\sigma_{зростають}$ з 230 до 460 МПа; $\sigma_{виг}$ – з 350 до 790 МПа; КС – з 9 до 33 кДж/м² у разі зростання фрактальної розмірності графіту з 1,51 (форма кулястого графіту) до топологічної розмірності площини 2 (форма компактного графіту). При зменшенні інформаційної розмірності графіту з 1,92 до 1,58 показники твердості HSD прокатних чавунних валків підвищуються з 40 до 60 одиниць за лінійним законом (рис. 4.29 , (4.20)).

Наведені вище експериментальні дані свідчать про вплив форми кулястого графіту, вираженої через величину фрактальної розмірності, на досліджувані механічні властивості сортопрокатних валків виконання СШХН, а розподілу графітних включень – на їхню твердість.

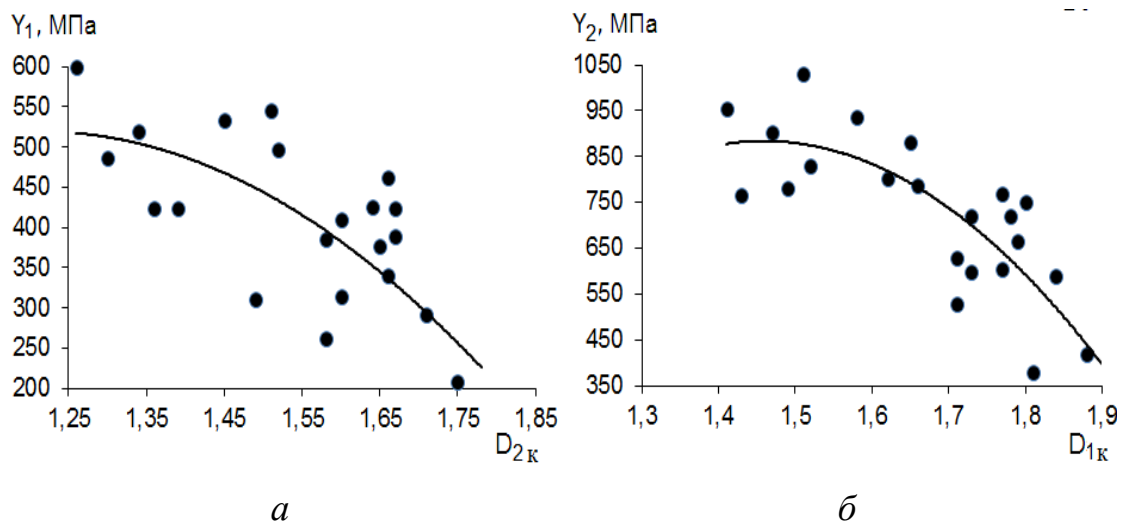
$$Y_1 = 55,185 \cdot D_{0Г}^{3,1302}, \quad R^2 = 0,51 \quad (4.18)$$

$$Y_2 = 126,000 \cdot D_{0\Gamma}^{2,7811}, \quad R^2 = 0,54 \quad (4.19)$$

$$Y_3 = 0,1323 \cdot e^{x p (2,7074 \cdot D_{0\Gamma})}, \quad R^2 = 0,91 \quad (4.20)$$

$$Y_4 = -67,239 \cdot D_{1\Gamma} + 170. \quad R^2 = 0,90 \quad (4.21)$$

Спостерігається тенденція підвищення показників міцності (рис. 4.30 а, б, рівняння (4.22) та (4.23)) та ударної в'язкості при зниженні кореляційної (рис. 4.30 а, рівняння (4.22)), інформаційної (рис. 4.30 б, (4.23)) та фрактальної розмірності (рис. 4.30 , (4.24)) ледебуриту та підвищення показників твердості при зростанні його фрактальної розмірності (рис. 4.30 з, (4.25)). Це свідчить про вплив геометричних характеристик графітних включень кулястого графіту: конфігурації форми, кількості та розподілу на показники якості чавунних валків виконання СШХН.



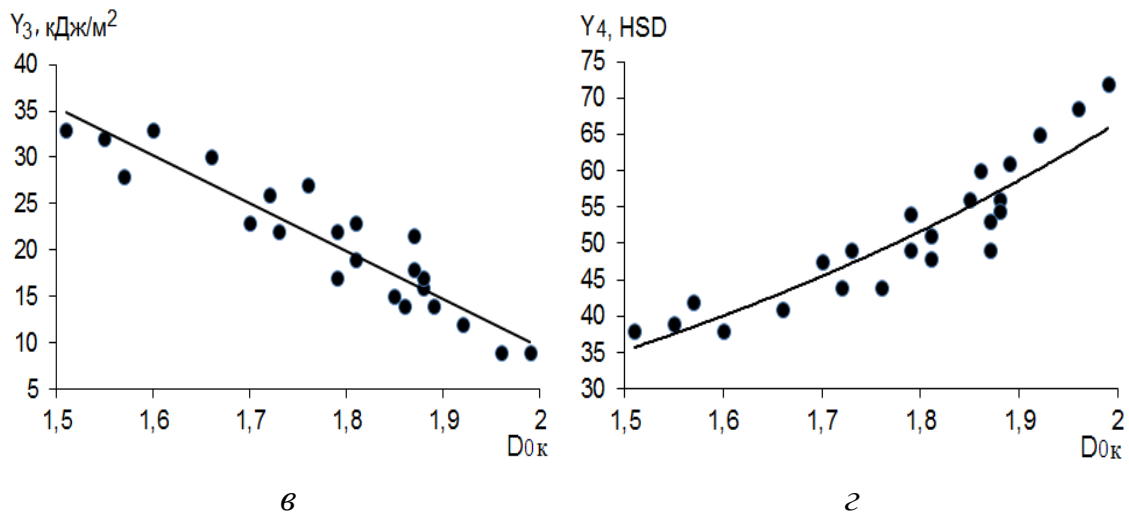


Рис. 4.30. Залежність Y_1 від кореляційної розмірності карбідів (a), Y_2 від інформаційної розмірності карбідів (b), Y_3 (ϑ) та Y_4 (ε) від фрактальної розмірності карбідів валків СШХН

$$Y_1 = -907,09 \cdot D_{2к}^2 + 2198,30 \cdot D_{2 до} - 812,48, \quad R^2 = 0,85 \quad (4.22)$$

$$Y_2 = -2497,70 \cdot D_{1к}^2 + 7286,50 \cdot D_{1 до} - 4430,20, \quad R^2 = 0,69 \quad (4.23)$$

$$Y_3 = -51,52 \cdot D_{0 до} + 112,66, \quad R^2 = 0,87 \quad (4.24)$$

$$Y_4 = 5,2061 \cdot \exp(1,2751 \cdot D_{0к}). \quad R^2 = 0,86 \quad (4.25)$$

Аналіз отриманих результатів показав перспективність застосування теорії мультифракталів для кількісної оцінки елементів структури чавунних валків сортопрокатних зі складною геометричною конфігурацією форми. Виявлено відхилення показників розмірності, що не перевищують $\pm 0,06$ – для валків виконання СПХН та $\pm 0,05$ – для валків виконання СШХН. Такий підхід дозволяє використовувати

статистичні оцінки розмірності графіту та карбідів, зокрема ледебури-ту, для прогнозу та коригування показників якості валкового металу за отриманими рівняннями (4.10-4.25) поряд з традиційними методами кількісної металографії, за допомогою яких оцінюють їх геометричні характеристики: форму, розподіл, розміри (довжину, діаметр) та зміст.

Таким чином, розмірні оцінки структури металу доцільно застосовувати для прогнозу механічних властивостей після встановлення їх чутливості.

РОЗДІЛ 5.

ФРАКТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНІ ПЛАЗМЕННИХ ПОКРИТТІВ

5.1. Фрактальне моделювання механічних властивостей поверхні металу після іонно-плазменного хромування

Останнім часом для вирішення задачі підвищення механічних властивостей матеріалів [1] використовуються нові методи поверхневого зміцнення [2, 3], зокрема лазерна обробка поверхні [4, 5], наплавлення поверхні [6, 7], детонаційне напилення [8], наномодифікування поверхні [9] та інші прогресивні методики. Слід зазначити, що не всі з перерахованих методик здатні забезпечити необхідний рівень фізико-механічних властивостей [10, 11].

Публікації останніх років, наприклад [1], свідчать, що застосування іонно-плазмового нанесення покриття є одним із перспективних підходів щодо забезпечення підвищення зносостійкості робочих поверхонь машин та деталей, які експлуатуються в умовах абразивного зносу. Іонно-плазменна обробка змінює структуру робочих поверхонь машин та деталей, яка у свою чергу визначає їх властивості. У більшості випадків подібна структура є неоднорідною, що ускладнює її кількісну оцінку із застосуванням традиційних методів металографії. Складність ідентифікації таких структур зумовлена вибором метрики вимірів [12]. Для оцінки структур різного ступеня складності застосовують останнім часом теорію фракталів, запроваджену Б. Мандельбротом [13], яка базується на нецілочисленній (фракталь-

ній) розмірності. Як показано в багатьох публікаціях, наприклад [14, 15], фрактальна розмірність виступає індикатором структурних змін та властивостей матеріалу.

Виходячи з вищесказаного, метою даної роботи є застосування фрактального формалізму для оцінки неоднорідної структури металевої поверхні після іонно-плазменної обробки з подальшим встановленням зв'язку між спектром розмірностей структури та механічними властивостями металу. Для вирішення поставленої мети в роботі реалізовані наступні завдання:

1. Дослідити вплив іонно-плазменної обробки на характер пошкоджень нанесених покриттів при зношуванні.

2. Застосувати мультифрактальний аналіз неоднорідної структури для оцінки механічних властивостей поверхні металу після іонно-плазменної обробки.

Зміцнені іонно-плазменним хромуванням поверхні мають хорошу зносостійкість [16].

У роботі виконано зміцнювальну обробку (іонно-плазменне хромування) за вдосконаленою технологією, що виключає перегрів деталей у процесі нанесення покриття та викрошування його під час випробування.

Високоякісні покриття із чистих металів отримані при температурах підкладки не менше 80–100 °С. Вихідними технологічними матеріалами для вакуумного іонно-плазменного напилення є катоди з напилюваних металів, в даному випадку хром (ВХ-1). Вакуумне іонно-плазменне напилення проводили на вакуумно-дуговій установці (рис. 6.1).

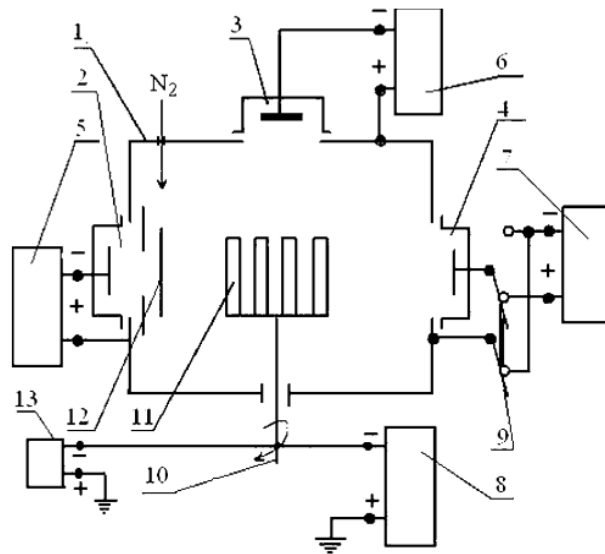


Рис. 5.1. Принципова схема модернізованої вакуумно-дугової установки.

1 – корпус вакуумної камери; 2, 3, 4 - вакуумно-дугові випарники; 5, 6, 7 – джерела живлення випарників; 8 - джерело живлення підкладки; 9 – перемикач; 10 - поворотний пристрій; 11 - вироби, що обробляються; 12 – екран; 13 - генератор високовольтних імпульсів [17]

Дослідження поверхні деталей, зміцнених іонно-плазменним хромуванням, проводили із застосуванням мультифрактального аналізу [18], що зумовлено неоднорідністю структури.

Мультифрактальний аналіз базується на оцінці статистичних характеристик елементів структури металу, які обчислюються за спектром розмірностей Реньї $D(q)$ [19]. Розмірності $D(q)$ є набором статистичних розмірностей [20] однорідних підмножин (елементів структури) вихідної множини (структури), які дають найбільший внесок у

статистичну суму $\sum_{i=1}^N p_i^q$ при заданих значеннях показника ступеня q .

Ця статистична сума визначає розподіл ймовірностей по всіх точках досліджуваної поверхні:

$$D(q) = \frac{1}{q-1} \lim_{\varepsilon \rightarrow \infty} \frac{\ln \sum_{i=1}^N p_i^q}{\ln \varepsilon}, \quad (5.1)$$

де p_i - ймовірність знаходження досліджуваної точки (пікселя для ЕОМ), що належить об'єкту, який розглядається, в i -му осередку квадратної сітки розміром ε . Показник степені q може приймати будь-які значення в діапазоні від $-\infty$ до $+\infty$. У роботі показник степені q змінювався в діапазоні від $q_{min} = -600$ до $q_{max} = 600$.

Позначивши через $D_0, D_1, D_2, D_\infty, D_{-\infty}$ розмірності спектра Реньї, що характеризують відповідно: D_0 - однорідний фрактал (розмірність Хаусдорфа) при $q=0$; D_1 - інформаційну розмірність при $q=1$ (інформаційну ентропію) характеризує швидкість зростання кількості інформації та показує, як зростає інформація, необхідна для визначення місця розташування точки, що знаходиться на об'єкті дослідження, при прагненні розміру клітинки δ , якими покривають об'єкт, до нуля; D_2 - кореляційну розмірність, що при $q=2$ характеризує ймовірність знаходження в одному і тому ж осередку сітки двох точок що знаходяться на об'єкті спостереження; $D_{+\infty}$ - розмірність, що характеризує найбільш розріджений простір в об'єкті спостереження (при $q=+\infty$); $D_{-\infty}$ - розмірність, що характеризує найбільш концентрований простір (при $q=+\infty$), який спостерігається в цьому об'єкті.

Фрактальна розмірність (розмірність Хаусдорфа) обчислювалася за формулою спектра розмірностей (5.1) при $q = 0$ і дорівнює:

$$D = -\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon}, \quad (5.2)$$

де $N(\varepsilon)$ – кількість клітин розміром ε , якими покривають досліджувану структуру.

Для визначення степені неоднорідності структури обчислювався спектр сингулярності $f(\alpha)$ (5.3). Цей спектр описується заповненням квадратних осередків ε з однаковими ймовірностями, коли $p_i(\varepsilon) \approx \varepsilon^\alpha$.

$$\begin{cases} \alpha = \frac{d\tau(q)}{dq}, \\ f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \end{cases} \quad (5.3)$$

Спектр $f(\alpha)$ обчислювали шляхом перетворень Лежандра функції $\tau(q)$ для кожного досліджуваного фотознімку мікроструктури поверхні деталей машин.

Для вирішення поставленого завдання було реалізовано наступні етапи:

1. Аналіз пошкоджених робочих поверхонь випробуваних деталей машин за характером та місцем розташування зон з метою реалізації технологічного процесу їх зміцнення із застосуванням іонно-плазменного хромування.

2. Реєстрація зміни структури та властивостей зміцнених поверхневих ділянок досліджуваних у процесі експлуатації деталей із застосуванням фрактального формалізму.

У ході реалізації першого етапу досліджувався характер пошкодження деталей після зношування, зміцнених іонно-плазменним хромуванням за вдосконаленою технологією (рис. 5.2 та рис. 5.3).

На випробуваних деталях дослідженого варіанту спостерігаються тріщини (рис. 5.2 та рис. 5.3).

На корпусі та втулці тріщини спостерігаються у зонах «А» та «В». Глибина їх на корпусі досягає 0,55 мм, на втулці - 0,4 мм. У зоні "С" тріщини відсутні. На бойку тріщини фіксуються в зоні « N » глибиною до 0,3 мм та в зоні «М» – до 0,6 мм. На пікі тріщини спостерігаються лише у зоні «М», глибиною до 0,6 мм.

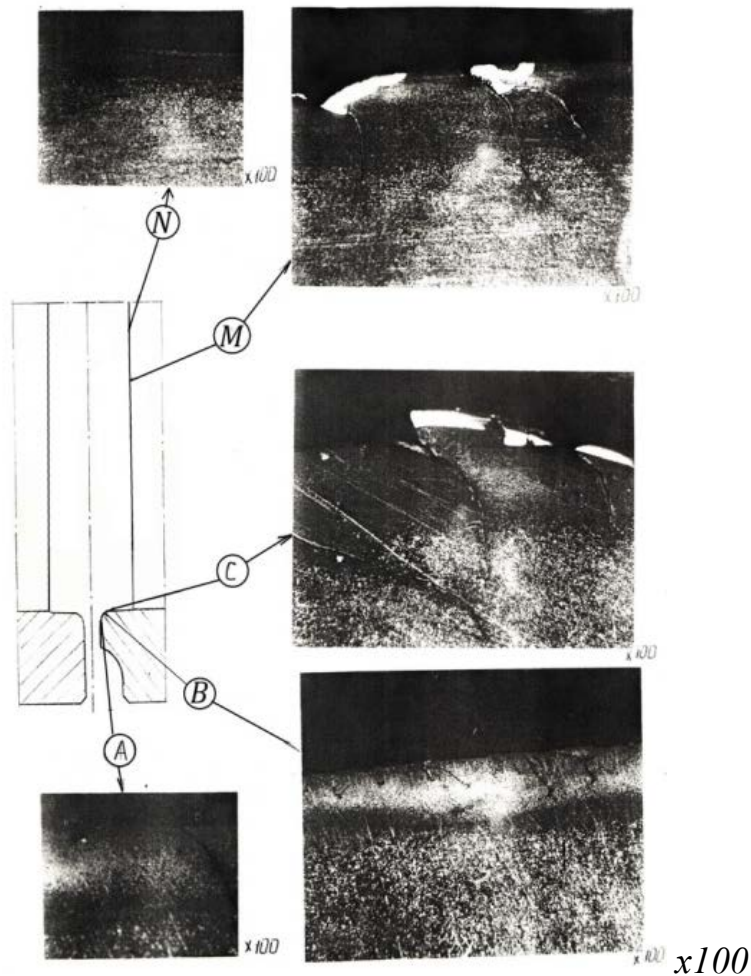


Рис. 5.2. Структурні зміни матеріалу корпусу та бойка, зміцнених іонно-плазменним хромуванням (за вдосконаленою технологією)

Вид тріщин у зламах аналогічний тому, що раніше спостерігається в інших варіантах зміцнення (окреслений контур, окислення і заглаженість поверхні).

На корпусі та втулці залишки покриття спостерігаються в зонах «А» та «С».

Товщина покриття на втулці в зонах «А» та «С» - 10 мкм, на корпусі (каналі) в зоні «С» до 10 мкм. На бойку та пікі покриття зберіглося лише у зонах «N» та «Е». Товщина шару на бойку - 10 мкм, на пікі - до 5 мкм.

У металі досліджуваних деталей у зонах ушкодження спостерігаються структурні зміни. На втулці структурні перетворення на глибину 0,25–0,30 мм відзначаються у зонах «А» та «В», на верхній – на глибину 0,15–0,20 мкм у зонах «А», «В» та «С» відповідно.

Твердість матеріалу HV у зонах структурних перетворень змінювалася в межах 510–645 одиниць.

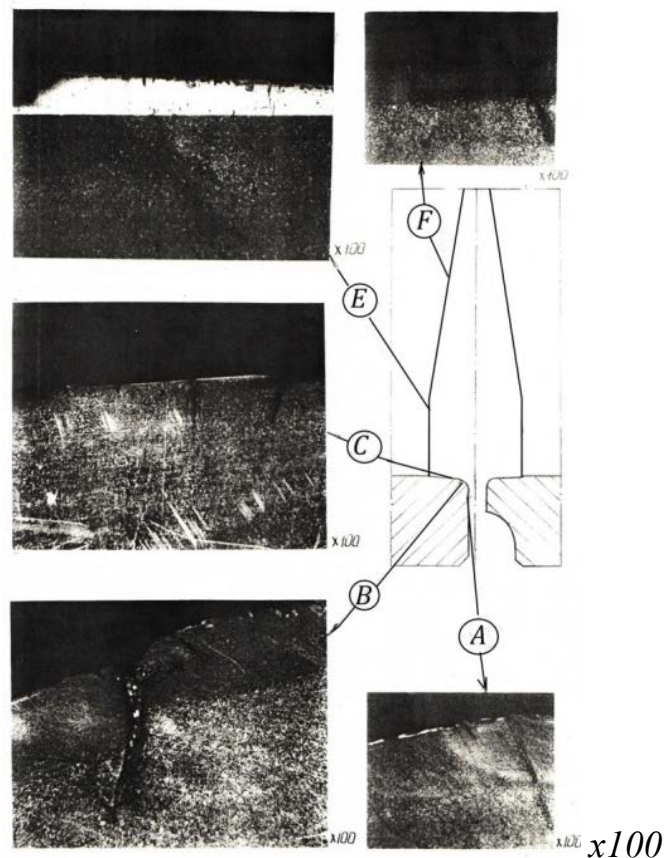


Рис. 5.3. Структурні зміни матеріалу піки та втулки, зміцнених іонно-плазменним хромуванням (за вдосконаленою технологією)

У матеріалі піки структурні зміни на глибину 0,25– 0,30 мм спостерігаються у зонах «N» та «M». На бойці у цих зонах глибина структурних змін – 0,15–0,20 мм. Твердість матеріалу у зонах структурних змін – HV 510–585.

Твердість матеріалу досліджених деталей становить:

втулка – HRC 40-42; піка - HRC 40-42;

корпус - HRC 40-42; бойок - HRC 40-42.

Мікроструктура матеріалу деталей сорбітного типу, тонкодисперсної будови.

Задля реалізації другого етапу досліджень застосовувався фрактальний підхід.

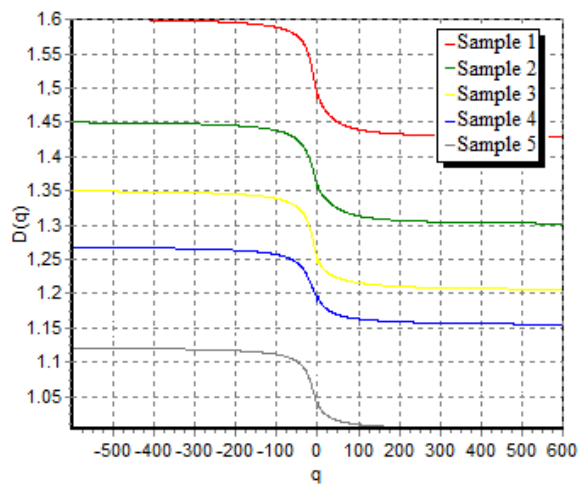
На підставі результатів аналізу спектра статистичних розмірностей $D(q)$ та спектра сингулярностей $f(\alpha)$, обчислені наступні статистичні характеристики структури [21]:

– *однорідність*, яка описує локальну дефектність аналізованої структури, пористість чи шорсткість її окремих елементів. У разі її відповідає величина D (при $q = 600$), збільшення значень якої свідчить про зростання однорідності структури. Якщо структура повністю однорідна, спектр $f(\alpha)$ вироджується в точку. Неоднорідність структури означає нерівномірний розподіл точок по областях, на які розбивається структура, тобто її геометрично однакові елементи заповнені точками з різною ймовірністю;

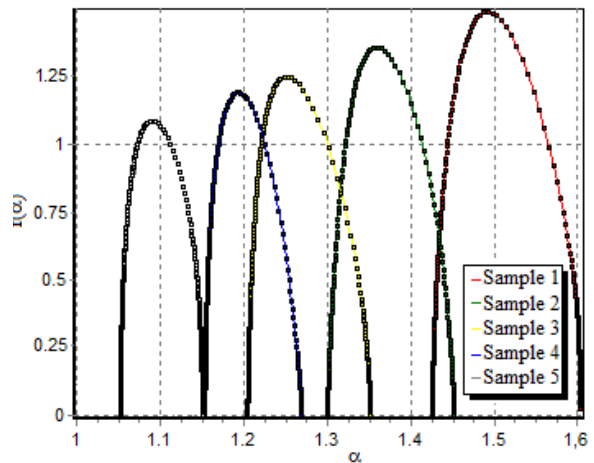
– *упорядкованість структури або прихована періодичність* $\Delta = D_1 - D_{600}$ та *регулярність* $K = D_{-600} - D_{600}$. Розмірність D_1 носить на-

зву інформаційної розмірності та обчислюється зі спектру розмірностей при показнику q рівному 1. Дані характеристики описують міру порушення симетрії структури або ступінь нерівноважності системи. Чим вище чисельні значення показників Δi та K , тим більше у структурі періодичних складових (повторюваних структурних елементів однієї структурної складової) і тим більше вона впорядкована.

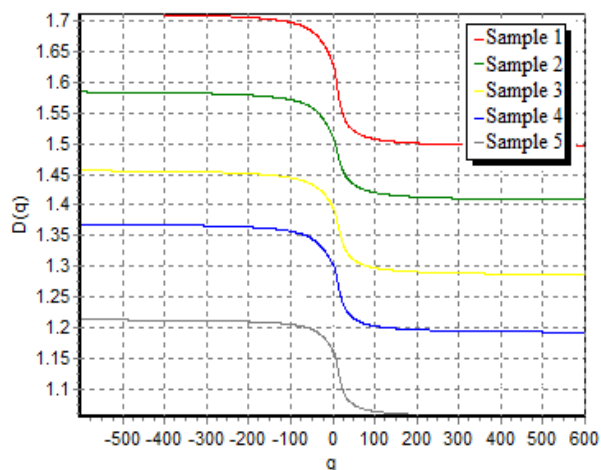
На рис. 5.4 и рис. 5.5 наведено розрахунки спектрів функцій $D(q)$ і $f(\alpha)$ для структур поверхні бойка, що наведені на рис. 5.2 та піки (див. рис. 5.3). Характеристики однорідності, упорядкованості та регулярності обчислені на основі аналізу спектру $D(q)$ (рис. 5.4). Спектр $f(\alpha)$ (рис. 5.5) визначає ступінь розмірної однорідності структури.



a

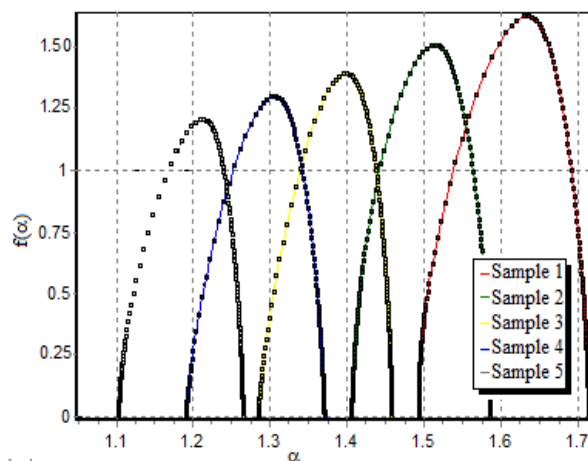


a



б

Рис. 5.4. Спектр статистичних розмірностей Реньї $D(q)$ для бойка (а) та піки (б)



б

Рис. 5.5. Спектр сингулярностей $f(\alpha)$ для бойка (а) та піки (б)

Розмірність D_{-600} описує найбільш концентрований простір (темні ділянки структури) з переважанням цементиту. Це зумовлено тим, що сорбіт являє собою евтектоїдну суміш цементиту та фериту. Пластини цементиту в сорбітній структурі, що розглядається, мають темний колір, а пластини фериту - мають світлий колір. Тому розмірність D_{600} відповідає світлим ділянкам структури (пластинам фериту).

Результати експерименту по визначенню механічних властивостей деталей машин (межа міцності σ_B , межа текучості $\sigma_{0,2}$, відносне видовження δ та звуження ψ), та спектра мультифрактальних характеристик його сорбітної структури за формулами (5.1) та (5.2) наведені в табл. 5.1.

Таблиця 5.1.

Значення характеристик однорідності, упорядкованості та регулярності сорбітної структури (осьовий напрямок вирізки зразків)

Деталь	Номер зразка	Механічні властивості				Мультифрактальні характеристики			
		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	D_{600}	Δ	K	D_0
Бойок	1	1390	1310	9,0	25	1,49	0,06	0,15	1,50
	2	1410	1320	8,0	23	1,35	0,05	0,15	1,36
	3	1400	1330	8,5	24	1,25	0,04	0,14	1,27
	4	1420	1345	7,5	23	1,20	0,05	0,12	1,21
	5	1430	1360	7,0	22	1,04	0,03	0,11	1,05
Піка	1	1450	1360	8,0	15	1,50	0,08	0,21	1,64
	2	1440	1380	8,5	11	1,41	0,09	0,17	1,54
	3	1460	1370	7,0	8	1,29	0,12	0,18	1,42
	4	1470	1380	6,4	5	1,20	0,09	0,17	1,30
	5	1480	1390	6,0	3	1,05	0,06	0,16	1,17

На рис. 5.6 показані гістограми впливу мультифрактальних характеристик мікроструктури бойка та піки на механічні властивості металу.

Гістограми побудовані на підставі аналізу коефіцієнтів кореляції між мультифрактальними характеристиками та механічними властивостями металу.

Аналіз мультифрактальних статистичних характеристик однорідності, упорядкованості та регулярності елементів структури показав, що висока до них чутливість спостерігається для межі текучості

(рис. 5.6 а). Експериментально встановлено, що для бойка коефіцієнти чутливості мультифрактальних характеристик структури K_i змінюються від 0,67 до 0,97.

Статистичні характеристики мікроструктури піку найбільш чутливі до відносного звуження (рис. 5.6 б). Коефіцієнти чутливості ψ до розмірності найсвітліших ділянок структури (пластин фериту) становлять 0,98, а для δ показник K_i становить 0,85. Для δ та ψ зафіксовано також відносно високі показники до їхньої фрактальної розмірності – по 0,97 відповідно. Такі результати пояснюються тим, що ферит має високі пластичні властивості в порівнянні з цементитом, що розглядається. Тому така чутливість пластичних властивостей δ і ψ до мультифрактальних статистичних характеристик фериту закономірна. У цьому випадку для піки (рис. 6.6 б) чутливість між показником регулярності $K = D_{-600} - D_{600}$ і межею плинності становить 0,92, оскільки цементит більш визначає властивості міцності в порівнянні з феритом.

Результати мультифрактального аналізу свідчать, що статистичні характеристики структури можуть бути індикатором зміни механічних властивостей.

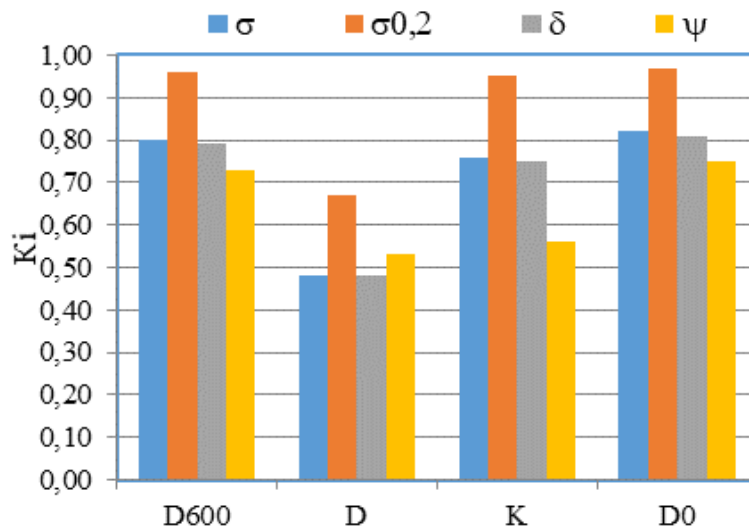
На підставі аналізу результатів показників чутливості механічних властивостей до мультифрактальних статистичних характеристик структури (рис. 5.6) отримані фрактальні моделі для бойка (6.4) та піки (5.5).

$$\begin{aligned} \sigma_{0,2} = & 1488,16 + 115,50 \cdot D_{600} + 32,57 \cdot \Delta - \\ & - 460,62 \cdot K - 188,62 \cdot D_0, \quad R^2 = 0,88. \end{aligned} \quad (5.4)$$

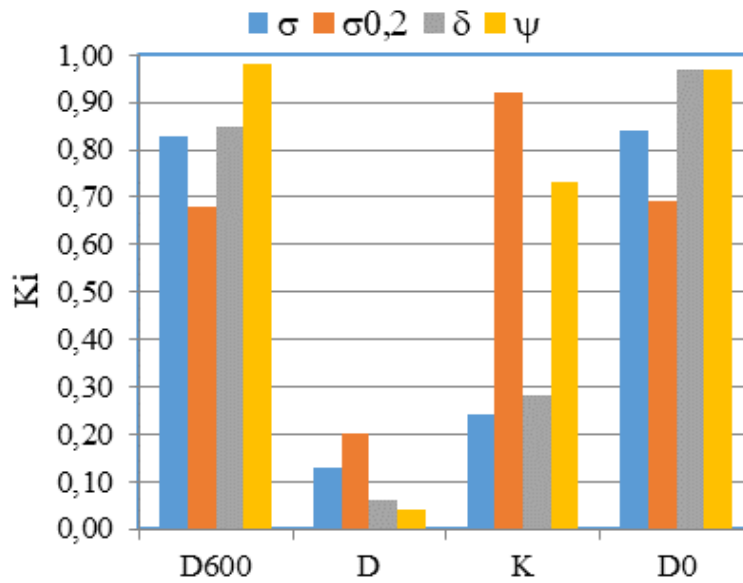
$$\psi = - 29,17 - 33,03 \cdot D_{600} - 24,82 \cdot \Delta + 28,17 \cdot K +$$

$$+ 54,72 \cdot D_0,$$

$$R^2 = 0,89. \quad (5.5)$$



a



b

Рис. 5.6. Вплив показників однорідності D_{600} , упорядкованості Δ , регулярності K та фрактальної розмірності D_0 на властивості міцності і пластичні бойка (*a*) та піки (*b*)

Адекватність моделі (5.4) згідно зі статистикою Durbin-Watson [22] склала 2,62, а для моделі (5.5) становила 3,12.

Фрактальні моделі (5.4) і (5.5) описують комплексний вплив однорідності, упорядкованості, регулярності та фрактальної розмірності на механічні властивості $\sigma_{0,2}$ та ψ .

Слід зазначити, що встановлено додаткові зв'язки між структурою та фізико-механічними властивостями металу в процесі експлуатації після іонно-плазменної обробки. Такий підхід надає можливість використання даних фрактальних моделей в якості неруйнівного методу оцінки механічних властивостей.

По даній тематиці можна зробити наступні висновки:

1. Досліджено вплив іонно-плазменної обробки на характер пошкоджень покриттів деталей. Пошкодження деталей характеризується зносом покриття, наклепом металу, утворенням борозен-задирів та тріщин. У найбільш навантажених частинах деталей (в зонах «В» і «С» на корпусі бойка і втулці та «М» і «F» на бойку і пікі) зміцнювальне покриття практично повністю зносилося. Удосконалена технологія іонно-плазменного хромування забезпечує роботу зміцнених деталей без сколів та викрошування покриття. Особливістю результатів випробувань даного варіанту зміцнення є менше зношування нижніх деталей (втулка, піка) в порівнянні з верхніми.

2. Застосовано мультифрактальний аналіз неоднорідної сорбітної структури для оцінки механічних властивостей деталей після іонно-плазменної обробки. Адекватність отриманих моделей (5.4) та (5.5) підтверджується статистикою Durbin-Watson. Встановлено чутливість мультифрактальних характеристик цементиту до властивостей міцно-

сті σ_B (0,80) і $\sigma_{0,2}$ (0,96), а також фериту до пластичних властивостей δ та ψ (0,97), яка підтверджується гістограмами на рис. 5.6.

5.2. Застосування сучасних методів фрактального формалізму для дослідження впливу плазменних покриттів на оцінювання зносостійкості деталей об'ємного гідروприводу

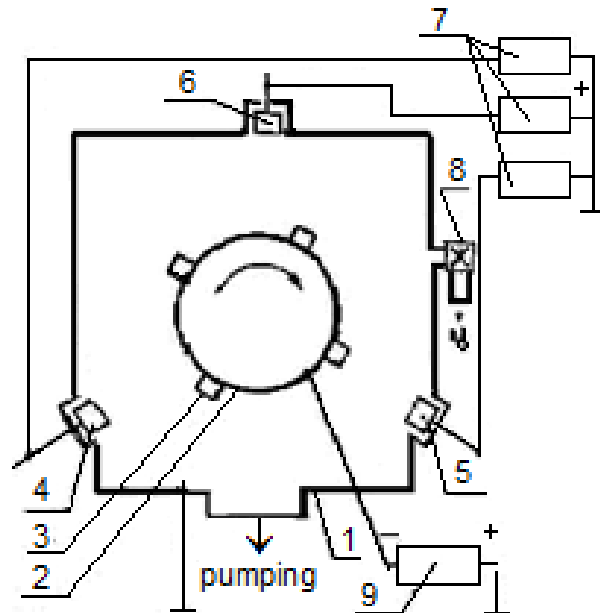
На структуру та властивості багатьох матеріалів впливають методи їх отримання, режими їх обробки, фазовий та хімічний склад, тощо [1-4].

Нанесення покриття нітриду титану на деталі об'ємного гідроприводу вплинуло на триботехнічні характеристики: підвищилася зносостійкість, зменшився коефіцієнт тертя. Але ефективність роботи цих відповідальних деталей залежить від довговічності, яка в даному випадку передбачає зменшення або зведення до нуля небезпеки зміцнення поверхні та від такого важливого показника, як корозійна стійкість [5-8]. На основі аналізу робіт, присвячених використанню плазмових покриттів [9-12] вибрано покриття системи Ti-Cr-N з попереднім іонним бомбардуванням поверхні хромом. Як матеріал для іонного бомбардування був обраний Cr. Іонне бомбардування збільшує щільність центрів зародка освіти, зменшує кількість вакансій і пір, вводить теплову енергію безпосередньо в поверхневу зону, стимулюючи дифузійні процеси. Для кожної температури та типу покриття існують оптимальні режими іонного бомбардування, що призводять до отримання найбільш досконалої структури. Іонне бомбардування призводить до зменшення розмірів зерен, що сприяє формуванню нанокристалічних плівок. Регулюючи енергію та щільність потоку іонів бомбардують, можна керувати розмірами зерен. Відомо, що найкращі

поєднання міцності та пластичних властивостей має місце при розмірах зерен менше 10 нм [13].

Мета роботи – дослідження доцільності застосування фрактального підходу для оцінки впливу плазменних покриттів для підвищення зносостійкості деталей об'ємного гідроприводу. Обраний фрактальний аналіз успішно себе зарекомендував для моделювання структури та властивостей багатьох матеріалів [14-18].

Для нанесення покриття Ti–Cr–N на поверхню сталі 38Х2МЮА було переобладнано камеру установки (рис. 5.7).



1 – вакуумна камера; 2 – циліндрична обичайка; 3 – деталі; 4, 5, 6 – катоди; 7 – зварювальні випрямлячі; 8 – натискач; 9 – джерело негативної напруги

Рис. 5.7. Схема вакуумної камери для осадження покриттів з подвійних систем нітридів

У центрі вакуумної камери вмонтована циліндрична обичайка 2 з деталями, на які наноситься покриття 3. На бічних фланцях

вакуумної камери розміщені джерела 3 плазми на основі вакуумних дуг, які містять металеві катоди 4, 5, 6. Одним з джерел плазми (катод 4) випаровували Ti, а двома, що залишилися – Cr. Радіус обичайки коригує відстань від деталей до випарників. Ця відстань може змінюватись у межах розміру камери установки. У процесі обертання поверхня, що напилюється, деталей проходить по чергово під діючими катодами 4, 5, 6. Покриття, що осаджується, залежить від відстані від деталі до випарника, швидкості обертання обичайки, кількості випарників, матеріалу катодів). Визначення цих параметрів у кожному конкретному випадку представляється важливим, так як при одночасній роботі трьох катодів існують області, де не відбувається конденсація прямого потоку речовини, де відбувається конденсація речовини, що випаровується тільки одним випарником і області, де перекриваються потоки від двох випарників. Кутова величина цих областей залежить від співвідношення між радіусом обичайки (r) та радіусом камери установки «Булат» (R).

Для наших умов експлуатації було вибрано співвідношення $r/R = 0,6$. Швидкість обертання обичайки з напиленими деталями становила 10 об/хв під час роботи трьох випарників. На пристрій отримано позитивне рішення на заявку № 2010 03834 від 02.04.2010. Використовувалися випарники з хрому (ВХ1-17) та титану (ВТ1-0).

Оцінювали міцність з'єднання покриття з підкладкою за методикою, заснованою на спільній пластичній деформації покриття та підкладки при впровадженні індентора твердоміра Роквелла. На кордоні покриття – підкладка виникають розтягувальні напруження. Якщо міцність зчеплення покриття з підкладки хороша, порушення суцільності навколо відбитка немає. Чим менший зв'язок покриття з підкладкою, тим більша площа його сколу навколо відбитку. Про

міцність сполуки покриття з основним металом судили за величиною відносної площі сколу покриття навколо відбитка. Площа визначалася з допомогою оптичного мікроскопа зі збільшенням 100 разів. Використовувався окуляр із сіткою.

Міцність сполуки K_α оцінювалася за формулою (5.6):

$$K_\alpha = \frac{S_0}{S_k + S_0}, \quad (5.6)$$

де S_0 – площа відбитка у площині робочої поверхні;

S_k – площа сколу покриття у площині робочої поверхні.

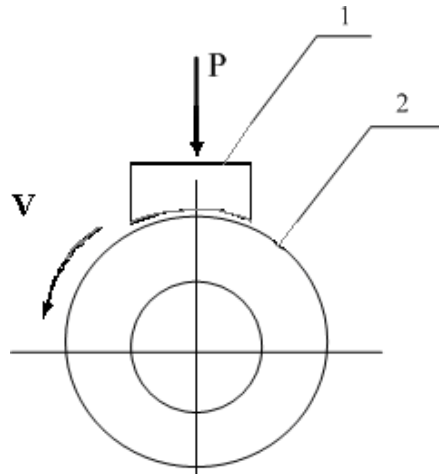
Значення змінювалися від нуля (погане з'єднання) до одиниці (при добрій адгезії з підкладкою).

При проведенні досліджень для вимірювання товщини покриття застосовувався металографічний метод, що полягає у вимірі товщини покриття за допомогою оптичного мікроскопа на поперечних шліфах. Але цей метод є руйнівним і дає можливість проводити вимірювання лише у площині шліфу.

Випробування на знос проводилися на машині тертя СМЦ-2, яка дозволяє проводити порівняння випробуваних матеріалів за зносостійкими властивостями по схемі «ролик-колодочка» (рис. 5.8).

Пара тертя складається з ролика, що обертається діаметром 50 мм, до циліндричної поверхні якого в спеціальній оправці притирається нерухома колодочка. Колодочка є частиною кільця, внутрішня поверхня якого (робоча поверхня) виконана строго по радіусу ролика. Контакт контртіл з чавуну СЧ20 під час роботи здійснюється по поверхні площею близько 2 см^2 для забезпечення

стійкості колодочки при випробуваннях. Змащування здійснювалось індустріальною олією марки I20A з додаванням 0,1 % абразивних частинок дисперсністю до 5 мкм. Ролики виготовлялись з сталей 45 та 38Х2МЮА у різних термооброблених станах.

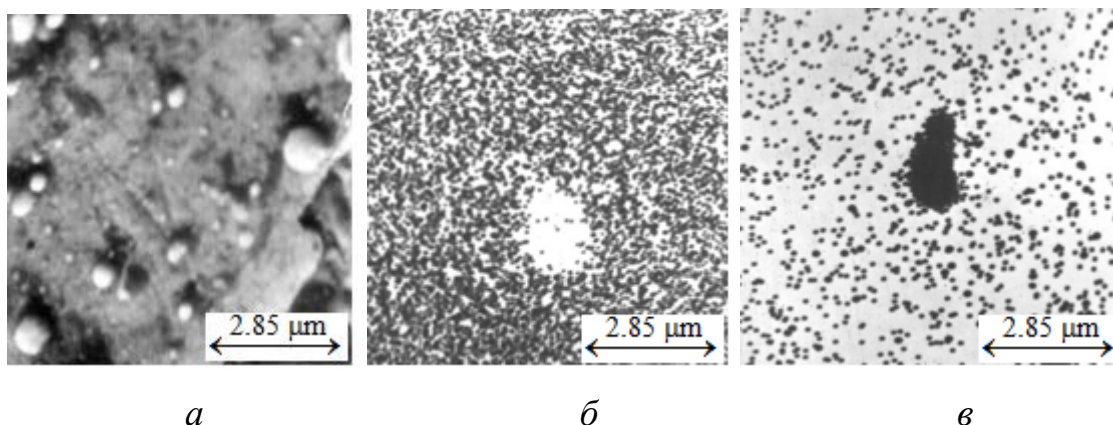


1 – нерухомий зразок (колодочка); 2 – рухливий зразок (ролик)

Рис. 5.8. Схема випробувань, що проводяться на машині тертя СМЦ-2

Структура поверхні покриття Ti–Cr–N досліджувалася за допомогою растрового електронного мікроскопа РЕМ при напрузі 30 кВ, що прискорюється, в інтервалі збільшення від 20 до 10000 разів.

На рис. 6.9 наведена структура досліджуваного матеріалу. Характеризується покриття Ti–Cr–N наявністю крапель Ti та Cr, серед яких частина знаходиться на поверхні, а частина закріплена в об'ємі покриття (рис. 5.9, б, в). Розподіл крапель Ti і Cr по поверхні неоднорідно за розмірами, що визначається природою металу, що осаджується, і умовами осадження.



a – загальний вид покриття; *б* – характер розподілу Cr в покритті в характеристичних променях Cr; *в* – характер розподілу Ti у покритті у характеристичних променях Ti

Рис. 5.9. Покриття Ti–Cr–N

Оптимальні режими процесу нанесення покриття Ti–Cr–N на робочі поверхні деталей об’ємного гідроприводу наведено у табл. 5.2.

Таблиця 5.2

Оптимальні режими процесу нанесення покриття Ti–Cr–N на робочі поверхні деталей об’ємного гідроприводу

Матеріал емісійного катоду	Струм дуги, I_1, A	Струм дуги, I_2, A	Напруга U, B	Струм I, A	Тиск $P, \text{тор}$	Час $t, \text{хв}$
1-й етап: очищення, розігрів та активація іонами хрому						
Хром	80	–	90	2	$1 \cdot 10^{-4}$	7
2-й етап: наплення шару покриття в атмосфері азоту або азотовмісного газу						
2 катода: 1-й – хром; 2-й – титан	80	70	150	3	$5 \cdot 10^{-3}$	25

Для оцінки впливу структури покриття Ti–Cr–N на показники його зносу застосовували фрактальний аналіз.

Фрактальна розмірність розраховувалася за методикою Хаусдорфа [14]. Фотознімки структури оброблялися в 256-кольоровому форматі з відтінками сірого кольору. Для обчислення значень фрактальної розмірності D (5.7) фотознімок структури покривався клітинками N , розмір l яких змінювався від 2 до 9 пікселів.

$$D = -\lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N(l)}{\ln l} \quad (5.7)$$

Приклад фрактального 3D аналізу для структури на рис. 6.9 а наведено нижче (рис 5.10).

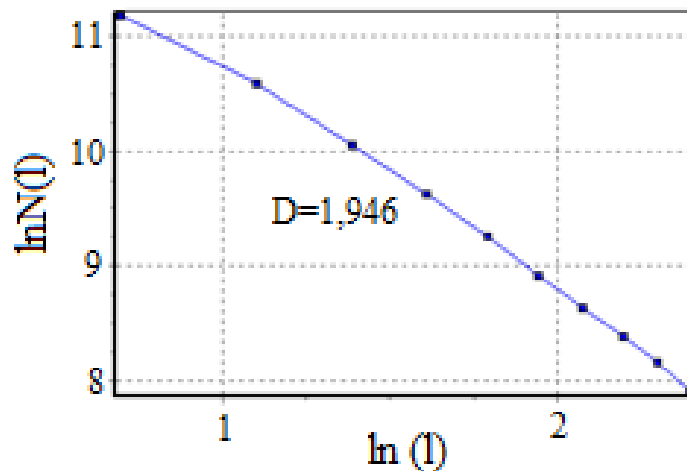


Рис. 5.10. Залежність клітинок, що покривають об'єкт, від їх розміру

Відомо, що велике значення має не тільки склад покриття, що наноситься, але і такі параметри, як твердість матеріалу підкладки, шорсткість поверхні, на яку наноситься покриття, товщина покриття. Як один з показників обрана твердість, так як вона легко піддається перевірці в будь-якій точці виробу без шкоди для цілісності як до, так

і після експлуатації. Практика експлуатації виробів з даної марки сталі показала з нанесенням на робочі поверхні плазменних покриттів показала, що жорсткість виробу на яке наноситься нанесення покриття повинна бути не менше, ніж 0,48 Ra. В протилежному випадку спостерігається відшарування покриття із-за поганої адгезії з підкладкою. Матеріалом дослідження була обрана сталь 38X2MЮА, термічна обробка – покращення, яке забезпечує найкраще співвідношення властивостей міцності та пластичності.

Після термічної обробки сталі 38X2MЮА її твердість коливається в межах 40...45 HRC. Товщина покриття, що наноситься, змінювалася в межах від 3 до 6 мікрон, що відповідає хорошій адгезії, менша товщина не робить істотного впливу на властивості виробу, а у разі товщини більше 6 мікрон спостерігається відшарування через погану адгезію з підкладкою. Відповідно до методів математичного планування експерименту, як варіюючий фактор приймемо товщину покриття та шорсткість, і позначимо їх X_1 і X_2 . Як функцію відгуку приймемо знос і позначимо Y . Виходячи з викладених вище міркувань, приймаємо, що межами існування (зміни) факторів є $X_{1\min} = 3$; $X_{1\max} = 6$; $X_{2\min} = 0,10$; $X_{2\max} = 0,48$. Інтервали коливання факторів відповідно $\Delta X_1 = 6 - 3 = 3$; $\Delta X_2 = 0,48 - 0,1 = 0,38$.

Спочатку було проведено факторний експеримент першого порядку, метою якого було отримати математичну модель залежності Y від X_1 та X_2 у вигляді лінійного полінома. Для цього було реалізовано (при кожному значенні твердості) повний факторний експеримент типу 2^n . Його результати представлені у таблицях 5.3–5.7. За показник D приймемо фрактальну розмірність покриття Ti–Cr–N робочої поверхні деталей об’ємного гідроприводу.

Результати досліджень визначення параметрів експериментів наведено в таблиці 5.3 – таблиці 5.7.

Таблиця 5.3

Значення величини товщини покриття, шорсткості та зносу при твердості підкладки 42 HRC

№ досліду	X ₁	X ₂	Y ₁	D
1	3,00	0,10	6,50	1,85
2	3,00	0,48	7,30	1,82
3	6,00	0,10	3,30	1,90
4	6,00	0,48	4,50	1,91
5	4,50	0,29	5,20	1,87
6	4,50	0,10	4,80	1,88
7	4,50	0,48	5,40	1,88
8	3,00	0,29	6,80	1,86

Таблиця 5.4

Значення величини товщини покриття, шорсткості та зносу при твердості підкладки 43 HRC

№ досліду	X ₁	X ₂	Y ₂	D
1	3,00	0,10	6,30	1,81
2	3,00	0,48	7,00	1,77
3	6,00	0,10	4,00	1,87
4	6,00	0,48	4,40	1,87
5	4,50	0,29	5,20	1,87
6	4,50	0,10	4,80	1,85
7	4,50	0,48	5,40	1,88
8	3,00	0,29	6,80	1,86
9	6,00	0,29	4,20	1,88

Таблиця 5.5

Значення величини товщини покриття, шорсткості та зносу при
твердості підкладки 44 HRC

№ досліду	X ₁	X ₂	Y ₃	D
1	3	0,10	5,60	1,83
2	3	0,48	6,20	1,76
3	6	0,10	3,60	1,91
4	6	0,48	4,00	1,89
5	4,5	0,29	5,00	1,84
6	4,5	0,10	4,40	1,88
7	4,5	0,48	5,20	1,85
8	3	0,29	6,00	1,80
9	6	0,29	3,80	1,90

Таблиця 5.6

Значення величини товщини покриття, шорсткості та зносу при
твердості підкладки 45 HRC

№ досліду	X ₁	X ₂	Y ₄	D
1	3	0,10	3,50	1,80
2	3	0,48	3,80	1,77
3	6	0,15	2,11	1,94
4	6	0,48	2,40	1,89
5	4,5	0,29	2,51	1,87
6	4,5	0,10	2,45	1,86
7	4,5	0,48	2,76	1,84
8	3	0,29	3,50	1,79
9	6	0,29	2,17	1,92

Таблиця 5.7

Значення величини товщини покриття, шорсткості та зносу при
твердості підкладки 46 HRC

№ досліду	X ₁	X ₂	Y ₅	D
1	3	0,10	4,40	1,83
2	3	0,48	4,80	1,78
3	6	0,10	3,00	1,90
4	6	0,48	3,40	1,88
5	4,5	0,29	4,00	1,90
6	4,5	0,10	3,80	1,85
7	4,5	0,48	4,10	1,84
8	3	0,29	4,60	1,82
9	6	0,29	3,40	1,87

По результатам обробки значень експериментів в таблицях 5.3 – 5.7 отримані лінійні моделі прогнозу показників зносу (5.8)-(12).

При 42 HRC:

$$Y_1 = 10.71 - 0.98 \cdot x_1 + 2.27 \cdot x_2 - 0.88 \cdot D \quad R^2 = 0.96 \quad (5.8)$$

При 43 HRC:

$$Y_2 = 11.65 - 0.80 \cdot x_1 + 1.48 \cdot x_2 - 1.69 \cdot D \quad R^2 = 0.95 \quad (5.9)$$

При 44 HRC:

$$Y_3 = 13.04 - 0.60 \cdot x_1 + 1.25 \cdot x_2 - 3.14 \cdot D \quad R^2 = 0.98 \quad (5.10)$$

При 45 HRC:

$$Y_4 = 17.64 - 0.12 \cdot x_1 + 0.16 \cdot x_2 - 7.73 \cdot D \quad R^2 = 0.89 \quad (5.11)$$

При 46 HRC:

$$Y_5 = 5.95 - 0.44 \cdot x_1 + 0.95 \cdot x_2 - 0.16 \cdot D \quad R^2 = 0.98 \quad (5.12)$$

Відносна похибка обчислень показників зносу коливалася в межах 0.04...8.96.

Виконавши прямий підрахунок, знайдемо найменше значення зносу в кожному випадку. В табл. 5.8 вказані дані по найменшим значенням зносу Y .

Таблиця 5.8

Найменші значення показників зносу в діапазоні 42...46 HRC

Твердість, HRC	аргументи			функція
	X_1	X_2	D	Y
42	6	0,10	1,90	3,30
43	6	0,10	1,87	4,00
44	6	0,10	1,91	3,60
45	6	0,15	1,94	2,11
46	6	0,10	1,90	3,00

Як видно з цієї таблиці, найменше значення зносу 2,11 прогнозується при значенні твердості 45, товщині покриття 6 і шорсткості 0,15.

Поверхня відгуку (рис. 5.11) та модель оцінки найменших значень зносу у задній точці $X_1=6$ (7) наведені нижче:

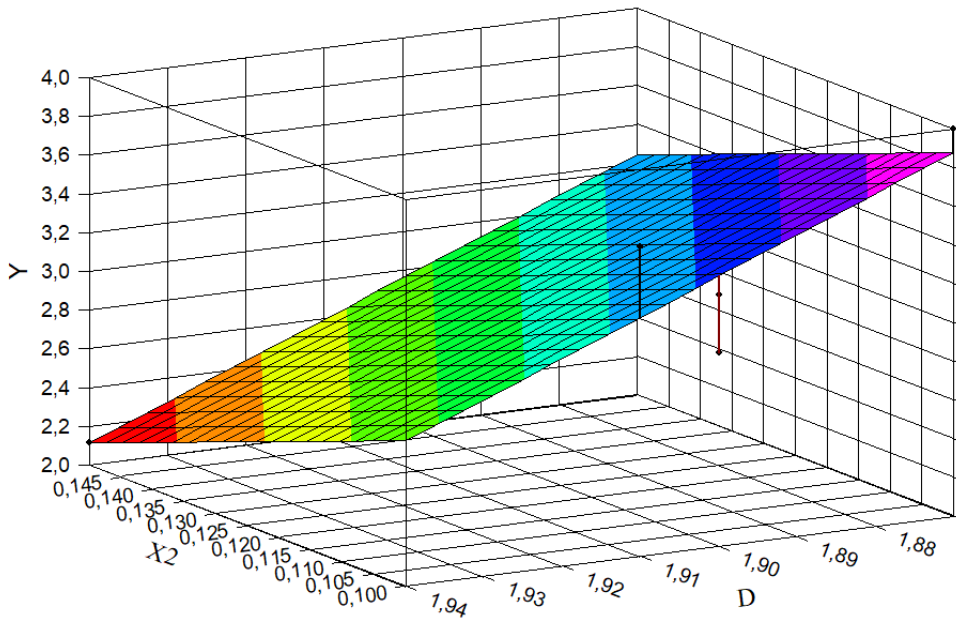


Рис. 5.11. Оцінка впливу шорсткості (X_2) та фрактальної розмірності поверхні (D) на показники зносу (Y) при фіксованій товщині покриття 6 мікрон

Коефіцієнт парної кореляції фрактальної моделі становить 0,84 (5.13), а з використанням тільки показників шорсткості основного матеріалу, коефіцієнт кореляції такої моделі оцінки зносу становить 0,73 (5.14) при фіксованих значеннях товщини покриття 6 мкм.

$$Y = 35.28 - 12.80 \cdot X_2 - 16.11 \cdot D \quad R^2 = 0.84 \quad (5.13)$$

$$Y = 27.30 - 6.20 \cdot X_2 \quad R^2 = 0.73 \quad (5.14)$$

Для підтвердження цієї гіпотези був проведений експеримент з визначення зносостійкості на рівні 2,11 при твердості 45, шорсткості 0,16 та товщині покриття рівної 6.

При цьому можна зробити наступні висновки:

1. Проведені дослідження доцільності застосування фрактального підходу для оцінки впливу плазменних покриттів для підвищення зносостійкості деталей об'ємного гідроприводу.

2. За допомогою методики планування експериментів встановлено, що найменше значення зносу деталі, виготовленої зі сталі 38Х2МЮА після термічної обробки поліпшення, отримано при твердості основного матеріалу 45 НRC шорсткості 0,15 і товщині покриття 6 мкм.

3. Проведено фрактальний аналіз покриття Ti–Cr–N, що характеризується наявністю крапель Ti та Cr, серед яких частина знаходиться на поверхні, а частина закріплена в об'ємі покриття. Фрактальна розмірність розраховувалася за допомогою клітинного методу Хаусдорфа.

Для оцінювання зносостійкості деталей об'ємного гідроприводу отримана фрактальна модель з коефіцієнтом кореляції 0,84, а для моделі з використанням тільки показників шорсткості основного матеріалу, коефіцієнт кореляції нижче, і становить 0,73 при фіксованих значеннях товщини покриття 6 мкм, що свідчить про доцільність застосування фракталів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Панамарьова О. Б. Пропорційне управління гідроагрегатами живлення малої потужності для гідросистем мобільних машин [Текст] / О. Б. Панамарьова // Тези доповідей II-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Гідро- та пневмоприводи машин», м. Вінниця, 15-16 листопада 2016 р. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – С. 64–66.
2. Аврунін Г. А. Основи об'ємного гідроприводу і гідро пневмоавтоматики: навчальний посібник / Г. А. Аврунін, І. Г. Кириченко, І. І. Мороз / Під ред. Г. А. Авруніна. – Харків : ХНАДУ, 2009. – 424 с.
3. Аврунін Г. А. Сучасні об'ємні гідроприводи для мобільних підйомників з робочими платформами / Г. А. Аврунін, І. Г. Кириченко, О. О. Резніков, І. І. Мороз / тези доповідей ХХІХ міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2021, 18–20 травня 2021 р.: у 5 ч. Ч. І. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХП». – 333 с. – С. 132.
4. Дворук В.І. Металофізика зношування при терті ковзання в присутності абразиву / В.І. Дворук, М.В. Кіндрачук / Proceedings of the National Aviation University. – 2005. – № 2. – С. 65–67.
5. Штофель О. О. Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку структури і властивостей конструкційних сталей : дисерт. на здоб. наук. ступ. кандидата технічних наук зі спец. 05.16.01 «Металознавство та термічна обробка металів» / О. О. Штофель / Київ. – 2021. – 163 с.
6. Огородніков, В. А. Механіка процесів холодного пластичного деформування вісесиметричних заготовок з глухим отвором : монографія / В. А. Огородніков, І. Ю. Кириця, В. Є. Перлов. – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 164 с.

7. Мартинюк С. С. Раціоналізація процесів хіміко-термічної обробки деталей автомобілів з урахуванням масштабів виробництва : дипломна робота / С. С. Мартинюк. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – 117 с.
8. Теорія та практика обробки матеріалів тиском / Під ред. Богуслаєва В. О., Бобиря М. І., Тітова В. А., Качана О. Я. – Запоріжжя, вид. АТ «Мотор Січ», 2016. – 522 с.
9. Закалов, О. В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник / О. В. Закалов, І. О. Закалов. – Тернопіль: Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. – 322 с.
10. Аврунин Г. А. Сучасні досягнення в трансмісіях та навісному обладнанні тракторів ХТЗ / Г. А. Аврунин / Матеріали II Всеукраїнської науково-технічної конференції «Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки». – Полтавський національний технічний університет імені Юрія Кондратюка, 2018. – С. 79–80.
11. Ткачук М. А. Узагальнений параметричний опис складних біомеханічних систем / М. А. Ткачук, В. О. Радченко, Ю. В. Веретельник // [Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Динаміка та міцність машин.](#) – 2005. – № 47. – 8 с.
12. Якущенко, І. В. Структурні характеристики та фізико-механічні властивості багатокомпонентних нітридних покриттів до і після іонної імплантації [Текст]: дисертація ... канд. фіз.-мат. наук, спец.: 01.04.07 «Фізика твердого тіла» / І. В. Якущенко; наук. кер.: О. Д. Погребняк, Йошихіко Такеда. – Суми: СумДУ, 2018. – 142 с.
13. Бондар О. В. Структура та фізико-механічні властивості багатокомпонентних та багат шарових наноструктурних покриттів : дис. ... д-ра фіз.-мат. наук : 01.04.07 «Фізика твердого тіла». – Суми, 2021. – 429 с.

14. Матохнюк Л. Є. Надійність і довговічність машин і споруд // Енциклопедія Сучасної України : енциклопедія [електронна версія] / ред.: І. М. Дзюба, А. І. Жуковський, М. Г. Железняк та ін.; НАН України, НТШ. Київ: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2020. – Т. 22. URL: <https://esu.com.ua/article-71545>
15. Глушкова Д. Б. Удосконалення технологічного процесу підвищення довговічності робочого інструменту гідромолотів детонаційним напиленням / Д. Б. Глушкова, В. А. Багров / Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр. – Харків: ХНАДУ, 2021. – Вип. 94. – С. 39.
16. Кашицький В. П. Розробка захисних покриттів з підвищеною зносостійкістю на основі епоксидних композитів, модифікованих кремнійорганічним лаком КО-921 : дисерт. на здоб. наук. ступ. канд. техн. наук зі спец. 05.02.01 «Матеріалознавство» / В. П. Кашицький / Луцьк. – 2006. – 151 с.
17. Гленсдорф П. Термодинамічна теорія структури, стійкості та флуктуації / П. Гленсдорф, І. Пригожин / Пер. з англ. – 2003. – 280с.
18. Попов С. М. Кореляційні залежності структури та властивостей сплавів при визначенні зносостійкості / С. М. Попов // Матеріалознавство та обробка металів. – 2003. – № 2. – С. 42–48.
19. Черевко О. І. Технологічні основи машинобудування : навч. посібник: У 2-х ч. / О. І. Черевко, В. М. Михайлов, І. В. Бабкіна, Б. В. Ляшенко / Харк. держ. ун-т харчування та торгівлі. – Харків, 2005. – Ч. 1. «Теоретичні основи технології машинобудування». – 83 с.
20. Холявко В.В. Фізичні основи міцності та руйнування [Текст]: Конспект лекційз дисципліни для студентів напряму підготовки 6.050403 «Інженерне матеріалознавство» спеціальності 8(7).05040303 – «Композиційні та порошкові матеріали, покриття»

- денної та заочної форм навчання / Уклад.: В.В. Холявко.– К.: НТУУ «КПІ», 2015. – 100 с.
21. Попов С. М. Зносостійкість сталей і сплавів в умовах адаптації до зовнішніх енергомеханічних впливів / С. М. Попов, В. С. Попов // Проблеми трибології. – 2006. – № 1. – С. 17–25.
22. Тихонович В. І. Про механізми зношування металів / В. І. Тихонович, В. П. Гаврилук // Металознавство та обробка металів. – 2003. – № 1. – С. 27–31.
23. Тимофеева Л.А., Комарова Г.Л. Металознавство та технологія конструкційних матеріалів: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Ч. 1. – 68 с.
24. Куріц Є. В. Дослідження впливу комбінованого зміцнення на напружений стан циліндричного зразка, що є моделлю деталі / Є. В. Куріц, А. П. Любченко, Г. І. Пашкова / Металофізика та новітні технології. – 2000. – Т. 22. – № 1. – С. 72–76.
25. Konecna R. Influence of nitriding on the fatigue behavior and fracture micromechanisms of nodular cast iron / R. Konecna, G. Nicoletto, V. Majerova, P. Vaicchi // Проблеми міцності. – 2008. – № 1. – С. 85–88.
26. Калиновський С. К. Базова класифікація машинобудівних матеріалів / С. К. Калиновський, В. Ю. Костиря, А. Г. Новгородова // Металургія та гірничорудна промисловість. – 2001. – № 1. – С. 50–57.
27. Бондаренко В. Л. Нові триботехнічні матеріали – шлях до довговічності машин та механізмів / В. Л. Бондаренко, А. М. Баранов // Інструментальний світ. – 2006. – № 2. – С. 12–15.
28. Рижков Ю. В. Карбонізація – ефективний метод підвищення надійності деталей гідроприводу / Ю. В. Рижков, Д. Б. Глушкова, Г.

- А. Аврунін // Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр. – Харків: ХНАДУ, 2007. – Вип. 39. – С. 126–128.
29. Васильєв М. О. Особливості формування структурно-фазового стану поверхневих шарів стопу Д16 внаслідок ультразвукового ударного оброблення залізним бойком в різних середовищах / М. О. Васильєв, Б. М. Мордюк, С. І. Сидоренко, С. М. Волошко, А. П. Бурмак // Metallofiz. Noveishie Tekhnol. – Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, 2017. – Т. 39. – № 1. – С. 49–68.
30. Чуфус В. М. Інтенсифікація охолодження фрикційних вузлів стрічковоколодкових гальм бурових лебідок для підвищення їх ефективності : дисерт. на здоб. наук. ступ. доктора філософії PhD зі спец. 131 «Прикладна механіка» / В. М. Чуфус // Івано-Франківськ. – 2020. – 235 с.
31. Шабля В. Т. Масоперенесення в металічних системах на основі Fe, Cu і Al при імпульсному та інтенсивному опроміненні іонами : дисерт. на здоб. наук. ступ. кандидата фізико-математичних наук зі спец. 01.04.07 «Фізика твердого тіла» / В. Т. Шабля // Суми. – 2008. – 140 с.
32. Аврунін Г. А. До вибору матеріалів робочих і розподільних ланок об'ємних гідромашин для потреб будівельно-дорожньої індустрії / Г. А. Аврунін, Д. Б. Глушкова, В. Б. Самородов, Є. С. Пелипенко, Ю. В. Рижков, Д. М. Шевченко, І. І. Мороз, А. І. Степанюк // Вісник ХНАДУ: зб. наук. пр. – Харків: ХНАДУ, 2020. – Вип. 91. – С. 172–186.
33. Глушкова Д.Б. Зміцнення та відновлення деталей циліндро-поршневої групи / Глушкова Д.Б. – Х.: 2021. – 200 с.
34. Олійник О. К. Підвищення довговічності деталей дизельних двигунів насиченням робочого шару високодисперсними добавками :

- автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.02.01 «Матеріалознавство» / О. К. Олійник. – Харків, 2008. – 17с.
35. Глушкова Д. Б. Особливості пошкоджуваності зварних з'єднань паропроводів зі сталі 12Х1М1Ф і 15Х1МФ / Д. Б. Глушкова, Г. А. Аврунін, Ю. В. Рижков, О. І. Воронков, А. І. Степанюк, А. А. Гнатюк / Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр. – Харків, 2021. – Вип. 94. – С. 85–90.
36. Рижков Ю. В. Дослідження впливу плазмового покриття на стійкість металевих форм / Ю. В. Рижков // Науковий вісник будівництва. Вип. № 55 – Харків, 2009. – С. 131–138.
37. Мощенок В. І. Підвищення експлуатаційних властивостей виробів: зб. наук. праць / В. І. Мощенок, Д. Б. Глушкова, В. П. Тарабанова // Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр. – Харків, 2006. – Вип. 33. – С. 54–56.
38. Мощенок В. І. Підвищення триботехнічних характеристик тертя зубчастих передач: зб. наук. праць / В. І. Мощенок, О. П. Любченко, Д. Б. Глушкова, О. К. Олійник // Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр. – Харків, 2007. – Вип. 33. – С. 64–66.
39. Глушкова Д. Б. Застосування теорії математичного планування при виборі оптимальних режимів поверхневого зміцнення / Д. Б. Глушкова, Ю. В. Рижков, В. А. Багров, А. І. Степанюк / Автомобільний транспорт : зб. наук. пр. – Харків, ХНАДУ, 2020. – Вип. 46.
40. Глушкова Д. Б. Визначення оптимальних пар тертя із застосуванням методу термоелектричної рухальної сили неруйнівного методу контролю / Д. Б. Глушкова, В. А. Багров // The 13 th International scientific and practical conference «Modern directions of scientific research development» (June 15–17, 2022) BoScience Publisher, Chicago, USA. 2022 – С. 268–277.

41. Високос С. М. Основи матеріалознавства : навчальний посібник / С. М. Високос, Ю. Ю. Глушко, М. В. Пеховка, В. О. Сашко, Т. М. Терещенко. – 2018. – 136 с.
42. Рижков Ю. В. Підвищення зносостійкості поверхонь, що труться / С. М. Дуб, А. Н. Ковальчук, Ю. В. Рижков, Д. Б. Глушкова, В. П. Тарабанова // Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр. – Харків, 2009. – Вип. 46. – С.39–42.
43. Большаков В.І. 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.
44. Hlushkova D. Studying the properties of steel for sidewalls of chute conveyors / Hlushkova D., Kalinin V., Stepanyuk A., Hnatyuk A., Serzhenko I. // International Science Group. – Boston : Primedia eLaunch, 2021. 758 p. Available at: DOI-10.46299/ISG.2021.MONO.TECH.II – P. 560-564. (колективна монографія).
45. Глушкова Д.Б., Багров В.А. Застосування сучасних технологій для підвищення зносостійкості деталей об'ємного гідроприводу / Theoretical and practical aspects of modern scientific research : collective monograph, Sherman Oaks, California : GS Publishing Services, 2022. - P. 171-178 (колективна монографія).
46. Наукові та технологічні основи підвищення трибологічних характеристик деталей мехатронних систем / Глушкова Д.Б., Рижков Ю.В., Байдала. – Харків, 2022. – 119 с.
47. Глушкова Д.Б. Підвищення надійності робочих органів гідрофікованих машин спеціального призначення: монографія. - Дніпро: Журфонд, 2023.- 258 с.

48. Gluskova D., Volchuk V. Determination of the optimal parameters of laser boriding to improve the wear resistance of piston rings // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні № 2, 2022. С. 29-32.
49. Глушкова Д.Б., Калініна Н.Є., Демченко С.В., Носова Т.В. Підвищення корозійної стійкості зварних з'єднань в результаті термічної обробки // Металловедение и термическая обработка металлов. - 2022. - №1. - С. 21-28.
50. Обґрунтування вибору скандію для мікролегування високоміцних алюмінієвих сплавів / Н.Є. Калініна, Д.Б. Глушкова, Н.І. Цокур, Т.В. Носова, В.А. Багров, С.В. Демченко // Авіаційно-космічна техніка і технологія, 2022, № 4 спецвипуск 2 (182). С. 114-118.
51. Багров В.А., Глушкова Д.Б. Формування структури та фазового складу зносостійких сталей, легованих титаном // Вісник ХНАДУ, Вип. 97, 2022. - С. 30-33.
52. Багров В.А., Глушкова Д.Б. Властивості зносостійких безнікелевих вториннотвердіючих сталей для наплавлення штампів гарячого оброблення металів // Вісник ХНАДУ, Вип. 97, 2022. - С. 34-37.
53. Структура й властивості порошкових газоплазменних покриттів на основі нікелю / Глушкова Д. Б., Багров В. А., Демченко С. В., Волчук В. М., Калінін О. В., Калініна Н. Є. // Вісник ХНАДУ, Вип. 97, 2022. - С. 74-81.
54. Способи отримання дисперсної структури та підвищення міцності кремній-марганцевистих сталей / Большаков В.І., Калінін О. В., Глушкова Д.Б., Тохтарь Г.І., Багров В.А., Гнатюк А.А.// Вісник ХНАДУ.-2021.-№94.- С. 7-12.
55. Волчук В. М. Модель оцінювання твердості чавунних валків СПХН-43 та СШХНФ-47 / В. М. Волчук // Металознавство та тер-

- мічна обробка металів. – 2019. – № 4. – С. 22–35. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.22.597>
56. Глушкова Д.Б. Удосконалення технологічного процесу підвищення довговічності робочого інструмента гідромолотів детонаційним напиленням/ Д.Б. Глушкова, В.А. Багров. // Вісник ХНАДУ.-2021.- №94.- С. 39-46.
57. Підвищення зносостійкості вузлів об'ємного гідропривода // Глушкова Д.Б., Аврунін Г.А., Рижков Ю.В., Воронков О.І., Степанюк А.І., Гнатюк А.А. // Вісник ХНАДУ.-2021.-№94.- С. 80-84.
58. Influence of temperature of thermal processing on intercrystalline corrosion resistance of welding joints / Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Dzhur Y.O., Khodyrev S.Ya., Kalinin V.T. // *Jornal of chemistry and technologies* 2020.-28(1).-p. 34-41.
59. Special features of the phase composition and structure of aluminum alloys modified by refractory nanocompositions / Kalinina N.E., Hlushkova D.B., Voronkov A.I., Sanin A.F., Kalinin V.T., Nosova T.V., Bondarenko O.V. // *Functional materials*. – 2020. - Vol. 27. - №3 (2020). - С. 508-512.
- 60.v.I. Bol'shakov, V.M. Volchuk. Materials science aspects of using of wavelet-multifractal approach to an evaluation of structure and properties of low-carbon low-alloyed steels // *Metallofiz. Noveishie Tekhnol.* 2011, v. 33, № 3, p. 347.
61. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V. Fractals Theory Application for Evaluation of Influence of Non Metallic inclusions on Mechanical Properties of S355J2 Steel // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1021. – № 1. – P. 012053. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1021/1/012053/meta>

62. Fractals and properties of materials : monograph / [V. Bol'shakov, V. Volchuk, Yu. Dubrov]. - Saarbrucken : Lambert Academic Publishing, 2016. - 140 p.
63. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Zotov D. S., Sokoliuk V. I. Fractal model of mechanical properties evaluation of C-Mn-Al-Ti-N steel with acicular ferrite structure for railway freight cars. //AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2021. – Т. 2389. – №. 1. – P. 080002. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0063496>
64. Vakhrusheva V. S., Volchuk V. M., Hruzin N. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of estimating quality of cold worked fuel cladding tubes //Voprosy Atomnoj Nauki i Tekhniki. – 2021. – Т. 135. – №. 5. – С. 57-63. URL: <https://doi.org/10.46813/2021-135-057>
65. Volchuk V. M., Uzlov O. V., Puchikov O. V., Ivantsov S. V., Tiutieriev I. A. Fractal model of structure-properties effect of low carbon steel //IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1100. – №. 1. – P. 012034. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/1100/1/012034/meta#references>
66. Декларацийний патент на винахід. 51439А України, G06K9/00. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення /В.І. Большаков, Ю.І. Дубров, Ф.В. Криулін, В.М. Волчук. – Зареєстр. 02.04.02: Опубл. 15.11.02, Бюл. № 11. – 4 с.
67. Bausk E. A., Volchuk V. M., Uzlov O. V. Remaining Service Life Evaluation of Nuclear Power Plants Construction Steel Elements //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Т. 1926. – №. 1. – С. 012050. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012050>

68. Kroviakov S., Volchuk V., Zavoloka M. Fractal Model of the Influence of Expanded Clay Concrete Macrostructure on its Strength. *Key Engineering Materials*. – 2020. – Vol. 864. – Pp. 43–52. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.864.43>
69. Volchuk V. Method of material quality estimation with usage of multifractal formalism / V. Volchuk, I. Klymenko, S. Kroviakov, M. Orešković // *Tehnički glasnik - Technical Journal*. – 2018. – Vol. 12. – № 2. – P. 93–97. URL: <https://doi.org/10.31803/tg-20180302115027>
70. Волчук В. М. Моделювання властивостей конструкційних матеріалів / В. М. Волчук // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2020. – № 1. – С. 21–35. URL: <http://mtom.pgasa.dp.ua/article/view/201950>
71. Волчук В.М. Аналіз балової мартенситної структури / В. М. Волчук // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2020. – № 4. – С. 38-44. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241120.38.689>
72. Bolshakov V. I. Evaluation of High Strength Steel Fatigue / V. I. Bolshakov, V. M. Volchuk, O. F. Parhomenko // *UDCS'19: Fourth International Iron and Steel Symposium*, April 4-6, 2019, Karabuk University, Karabuk, Turkey. – 2019. – Vol. 4. – Pp. 415–417. URL: <https://drive.google.com/open?id=1jfWwEhSuRl-3bGcv-dG7CzYnmMh7KcVT>
73. Hlushkova, D. B., V. M. Volchuk, Pavlo Polyansky, V. A. Saenko, and A. A. Efimenko. Fractal modeling the mechanical properties of the metal surface after ion-plasma chrome plating. // *Functional Materials*, 2023, 30(2), p.p. 275–281.

74. Волчук В.М. Оцінювання впливу вуглецю на структуру валків / В. М. Волчук, М. А. Котов, А. С. Штанденко // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2021. – № 4. – С. 33–44. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.281221.33.822>
75. Kroviakov S. Search for Ranking Approaches of Expanded Clay Concrete Quality Criteria / S. Kroviakov, V. Volchuk, M. Zavoloka, V. Kryzhanovskyi. In: *Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd. – 2019. – Vol. 968. – P. 20-25. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>
76. Kalinina N.E., Glushkova D.B., Voronkov A.I., Kalinin V.T. Influence of nanomodification on structure formation of multicomponent nickel alloys // Fu 1. Corrosion resistance of reinforced layers of 15X11MΦ steel steam turbine blades / Hlushkova D., Bagrov V., Stepaniuk A., Hrinchenko E.D., Hnatiuk A.A., Kalinina N.E., Kalinin V.T. // *ВАНТ*. - 2021. №2(132).- С. 136-141.
77. Спосіб оцінки якості та властивості виробів /Т.С. Скобло, С.О. Бурцев, О.Ю. Клочко [та інш.] //Патент України UA №71815, МПК(2012.01) C21D5/00. - №u 201200948; заявл. 30.01.2012; опубл. 25.07.2012, Бюл. №14. – 6 с.
78. Спосіб термічної обробки валків з високолегованого чавуну. / Т.С. Скобло, О.Ю. Клочко, В.Я. Погорєлов [та інш.] // Патент України UA №65602, МПК (2011.01) C21D5/00. - № u2011006215; заявл. 18.05.2011; опубл. 12.12.2011, Бюл. №23. – 10 с.
79. Increasing fretting resistance of flexible element pack for rotary machine flexible machine flexible coupling. Part 1. Analysis of the reasons affecting fretting resistance of flexible elements for expansion coupling / Tarelnyk V., Hlushkova D., Martsynkovskyy V., Dumanchuk M., Antoszewski B., Kundera Cz, Konopiiianchenko Ie, Tarelnik, N.,

- Hudkov S., Zahorulko A. // *Jornal of Physics: Conference Series.* - 2021. - 1741. - 11 p.
80. Structural and phase composition features of titanium and chromium nitride coatings obtained by ion-plasma deposition / D. Hlushkova, A. Voronkov, N. Kalinina, V. Kalinin, L. Polonskyi, A. Stepaniuk // *Functional Materials*, 27, № 4 (2020). - P. 710-715.
81. Матеріали металеві. Визначення твердості за Брінеллем. Ч.1 [Текст]: ДСТУ ISO 6506-1:2007. Метод випробування (ISO 6506-1:2005, IDT). – Чинний від 2009-01-01. – К. : Держспоживстандарт України, 2010. – IV, 12 с. : табл. – (Національний стандарт України).
82. Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання твердості Шора D [Текст] : ДСТУ. ГОСТ 8.516:2003 / оформ. Сікорська; - Офіц. чин. в Україні від 01.07.2004. – К. : Держспоживстандарт України, 2004. – III, III, 3 с. – (Національний стандарт України).
83. Неруйнівний контроль. Контроль ультразвуковий. Ч3. [Текст] : ДСТУ EN 583-3-2005 ; Метод проходження. (EN 583-1:1998, IDT) / пер. з англ. і наук.-техн. ред. В. Троїцький [та ін.] ; – Чин. від 01.01.2008. – К. : Державний комітет України з питань технічного регулювання та споживчої політики, 2007. – IV, 6 с. – (Національний стандарт України).
84. Неруйнівний контроль. Контроль магнітопорошковий. Ч2. [Текст] : ДСТУ EN ISO 9934-2:2005 ; Засоби контролювання (EN ISO 9934-2:2002, IDT) ; . – Чин. від 2008-01-01.- К. : Держспоживстандарт України, 2007. - V, 16 с.- (Національний стандарт України).
85. Метрологія. [Текст] ; ДСТУ 5017:2008 ; Державна повірочна схема для засобів вимірювання параметрів шорсткості Ra, Rmax і Rz в діапазоні від 0,025 мкм до 1600 мкм ; - Чин. від 2009-01-01. - К. :

- Держспоживстандарт України, 2009. - III, 5 с. - (Національний стандарт України).
86. ТУ У27.1-26524137-1291:2007. Валки чавунні для гарячого прокатування металів. – На заміну ТУ У27.1-00190319-1291-2002 ; Чин. з 01.02.2008. – X., 2007. – 29 с.
87. Use of detonation sputtering to increase the durability of hydraulic hammer critical parts / D.B. Hlushkova, I.H. Kirichenko, V.A. Bahrov, N.Ye. Kalinina, T.V. Nosova // PAST. 2021. №5 (135). p. 139-145.
88. Transformation of structure and properties of structural steel during nanomodification and strengthening treatment / V.I. Bolshakov, A.V. Kalinin, D.B. Hlushkova, Y.V. Ryzhkov, V.A. Bagrov // Functional materials. 28, №3, 2021. p. 486-491.
89. V.I. Bolshakov, O.I. Kalinin, N.E. Kalinina, D.B. Hlushkova, O.I. Voronkov, Y.V. Ryzhkov, A.I. Stepanyuk. Increasing the corrosion resistance of welded joints of heat-resistant nickel alloy with steel // ВАHT. 2022.-№1(37).- С. 195-198.
90. Hlushkova, O.I. Voronkov, Y.V. Ryzhkov, N.E. Kalinin, T.V. Nosova. Peculiarities of the formation of a hardened layer during laser borinizing of piston rings // ВАHT. 2022.-№1(37).- С. 199-201.
91. V.S. Vahrusheva, D.B. Hlushkova, V.M. Volchuk, T.V. Nosova, S.I. Mamhur, N.I. Tsokur, V.A. Bagrov, S.V. Demchenko, Yu.V. Ryzhkov, V.O. Scrypnikov. Increasing the corrosion resistance of heat-resistant alloys for parts of power equipment // ВАHT. 2022. No4(140). - С. 137-140.
92. D.B. Hlushkova, V.A. Bagrov, S.V. Demchenko, V.M. Volchuk, O.V. Kalinin, N.E. Kalinina. Structure and properties of powder gas-plasma coatings based on nickel // ВАHT. 2022. No4(140). - С. 125-130.

93. Большаков Вад.І. Про неповноту формальної аксіоматики в задачах ідентифікації структури металу / Вад.І. Большаков, В.І. Большаков, Ю.І. Дубров // Вісник НАН України. – 2014. – №4. – С. 55-59.
94. Большаков Вад.І. 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.
95. Большаков В.І. 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.
96. Глушкова Д. Б. Дослідження структури і фазового складу іонно-плазмових покриттів / Д. Б. Глушкова, О. І. Воронков, А. І. Степанюк, С. В. Демченко, Н. Є. Калініна, В. Т. Калінін / Вісник ХНАДУ : зб. наук. пр. – Харків, 2020. – Вип. 91. – С. 122–129.
97. Розробка системи спрямованого вибору найбільш ефективної технології підвищення якості бабітових покриттів підшипників ковзання. Ч.2. Математичний модель зносу бабітових покриттів. Критерії вибору технології нанесення бабітових покриттів / В. Б. Тарельник, О. П. Гапонова, Є. В. Коноплянченко, Н. В. Тарельник, М. Ю. Думанчук, В. О. Пирогов, Т. П. Волошко, Д. Б. Глушкова // *Metallophysics and Advanced Technologies* Металофізика і новітні технології. 2022, vol. 44, No. 12, pp. 1643–1659.
98. Influence of structure and phase composition on wear resistance of sparingly alloyed alloys/ D.B.Hlushkova, V.A. Bagrov, V.M. Volchuk, U.A. Murzakhmetova// *Functional Materials*, 30, №1 (2023), p. 74-78.
<https://doi.org/10.15407/fm30.01.74>

99. Study of wear of the building-up zone of martensite-austenitic and secondary hardening steels of the Cr-Mn-Ti system / D.B. Hlushkova, V.A. Bagrov, V.A. Saenko, V.M. Volchuk, A.V. Kalinin, N.E. Kalinina // *Питання атомної науки та техніки* 2023, № 2 (144). - p. 105-109.
100. Study of nanomodification of nickel alloy GS3 with titanium carbide / D.B. Hlushkova, A.V. Kalinin, N.E. Kalinina, V.M. Volchuk, V.A. Saenko, A.A. Efimenko // *Питання атомної науки та техніки* 2023, № 2 (144). - p.126-129.
101. Gödel K. Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I. / K. Gödel // *Monatshefte für Mathematik und Physik*. – 1931. – Vol. 38. – № 1. – P. 173–198.
102. Garashchenko Y. Fractal Analysis of Structural and Phase Changes in the Metal of Welded Steam Pipe Joints / Y. Garashchenko, A. Glushko, O. Kobets and O. Harashchenko // *Design, Simulation, Manufacturing: The Innovation Exchange*. – Springer, Cham. – 2021. – P. 31-40. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_4
103. Zhuravel' I. M., Michuda, L.Z. Application of the Mandelbrot–Zipf Law for the Quantitative Evaluation of the Average Size of Steel Grains / I. M. Zhuravel', L. Z. Michuda // *Materials Science* – 2021. – Vol. 57. – P. 80–85. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-021-00517-2>
104. Torop V. M. On the Causes of Fractures of Reinforcing Ropes of the Protective Shells of Power-Generating Units of Nuclear Power Plants / V. M. Torop, M. D. Rabkina, O. O. Shtofel, V. V. Usov, N. M. Shkatulyak, O. S. Savchuk // *Materials Science*. – 2018. – Vol. 54. – № 2. – P. 240-249. URL: <https://doi.org/10.1007/s11003-018-0179-y>
105. Volchuk V. M., Kotov M. A. Fractal express methods evaluation of a breaking stress of concrete // *Journal of Physics: Conference Series*. –

- IOP Publishing, 2021. – Т. 1926. – №. 1. – P. 012023. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1926/1/012023>
106. Quintana-Rodríguez J. A., Doyle J. F., Carrión-Viramontes F. J., Samayoa-Ochoa D. and López-López J. A. Material characterization for dynamic simulation of non-homogeneous structural members // *Key Engineering Materials*. – 2010. – Vol. 449. – P. 46–53. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.449.46>
107. Hongchao X. et al. The influence of surfactant on pore fractal characteristics of composite acidized coal // *Fuel*. – 2019. – Т. 253. – P. 741-753. URL: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.073>
108. Țălu Ș., Bramowicz M., Kulesza S., Dalouji V., Solaymani S. and Valedbagi S. Fractal features of carbon–nickel composite thin films // *Microscopy Research and Technique*. – 2016. – Vol. 79. – №. 12. – P. 1208-1213. URL: <https://doi.org/10.1002/jemt.22779>
109. Кобець А. С. Абразивно-втомний знос гумової футерівки в контексті фрактального аналізу / А. С. Кобець, В. І. Дирда, Є. В. Калганков, І. М. Цаніді, О. А. Черній // *Геотехнічна механіка*. – 2019. – Вип. 144. – С.103-110.
110. Nakano, T. and Miyazaki, J. Surface Fractal Dimensionality and Hygroscopicity for Heated Wood // *Wood research and technology*. – 2003. – Vol. 57, no. 3 – P. 289-294. URL: <https://doi.org/10.1515/HF.2003.043>
111. Dubrov Yu. Ways of regularization of materials science ill-posed problems / Yu. Dubrov, V. Volchuk // *Металознавство та термічна обробка металів*. – 2019. – № 4. – С. 47 – 50. URL: <https://doi.org/10.30838/J.PMHTM.2413.241219.47.600>
112. Кровяков С. О. Пошук підходів до ранжування критеріїв якості керамзібетону / С. О. Кровяков, М. В.Заволока, В. О. Крижановсь-

- кий, В.М. Волчук // Актуальні проблеми інженерної механіки: збірник тез VI Міжнар. наук.-практ. конф. – Одеса : ОДАБА, 2019. – С. 166-168. URL: <http://mx.ogasa.org.ua/handle/123456789/8254>
113. Samayoa D. Fractal model equation for spontaneous imbibition / D. Samayoa, L. A. Ochoa-Ontiveros, L. Damián-Adame, E. Reyes de Luna, L. Álvarez-Romero, G. Romero-Paredes // *Revista mexicana de física*. – 2020. – Vol. 66, no. 3. – P. 283-290. URL: <https://doi.org/10.31349/revmexfis.66.283>
114. D.B. Hlushkova, I.H. Kyrychenko, V.A. Bahrov, N.Ye. Kalinina, T.V. Nosova. Use of detonation sputtering to increase the durability of hydraulic hammer critical parts // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021, N 5(135), p. 139-145.
115. D.B. Hlushkova, V.A. Bahrov, O.D. Hrinchenko, A.A. Hnatiuk, N.E. Kalinina, V.T. Kalinin. Corrosion Resistance of Reinforced Layers of 15X11MФ Steel Steam Turbine Blades // *Problems of Atomic Science and Technology*. 2021, N 2(132), p. 136-141.
116. C. Paul, P. Ganesh, S. Mishra. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components // *Optics and Laser Technology*. 2007, N 39(4), p. 800-805.
117. G. Ram, A. Reddy, K. Rao. Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laserwelds // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, N 167(1), p. 73-82.