

**ПРИДНІПРОВСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ**

Волчук Володимир Миколайович

УДК 620.18.004.12

**РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКІСНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК МЕТАЛУ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ ФРАКТАЛЬНОЇ
РОЗМІРНОСТІ ЙОГО МІКРОСТРУКТУРИ**

Спеціальність 05.02.01 – Матеріалознавство

**Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Дніпропетровськ – 2004

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Придніпровській державній академії будівництва та архітектури Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор **Дубров Юрій Ісайович**,

Придніпровська державна академія будівництва та архітектури,
кафедра прикладної математики.

Офіційні опоненти:

д.т.н., професор **Шаповалова Оксана Михайлівна**, заслужений діяч науки і техніки України, за-
відувач лабораторії нових матеріалів та безвідходних технологій кафедри безпеки життєдіяльності
Фізико-технічного інституту ДНУ, м. Дніпропетровськ;

к.т.н., доцент **Погребна Наталія Еміліївна**, Національна металургійна академія України, доцент
кафедри металознавства, м. Дніпропетровськ.

Провідна установа:

ВАТ “Український науково–дослідний інститут авіаційної технології” Міністерства промислової
політики України, м.Київ.

Захист відбудеться « 26 » лютого 2004 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради
Д08.085.02 при Придніпровській державній академії будівництва та архітектури за адресою:
49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського 24-а.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Придніпровської державної академії будівництва
та архітектури за адресою: 49600, м. Дніпропетровськ, вул. Чернишевського 24-а.

Автореферат розісланий « 15 » січня 2004 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради

Кваша Е.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Вступ. Проблема оцінки структури та якісних характеристик металів вирішується протягом значного періоду часу методами і засобами фізики твердого тіла, механіки, хімії, матеріалознавства й інших наукових дисциплін. Причина цього полягає в тому, що сам по собі аналіз структури та оцінка якісних характеристик металів є трудомістким процесом і вимагає комплексного підходу, що полягає в поєднанні традиційних методів оцінки якісних характеристик металів з новими методами оцінки їхньої структури. Аналіз традиційних методів електронної та оптичної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, кількісної металографії свідчить, що жоден з них не може бути універсальним і придатним для рішення повного обсягу завдань ідентифікації якісних характеристик металу шляхом аналізу його структури.

Актуальність теми. Залучення для оцінки структури фрактальної геометрії надає можливість розраховувати фрактальну (дробову) розмірність складових їхньої структури. Фрактальна розмірність служить строгою кількісною характеристикою параметрів структури металів, що мають складну конфігурацію, наприклад: зерен, меж зерен, поверхонь руйнування, скупчень дислокацій, дрібнодисперсних часток вторинних фаз і т.д. В фрактальній розмірності відбивається компактність заповнення простору досліджуваним структурним елементом.

Таким чином, передумовою для проведення досліджень, спрямованих на встановлення можливої взаємно однозначної відповідності між якісними характеристиками досліджуваного металу і фрактальною розмірністю його мікроструктури, є припущення щодо їх взаємної однозначної відповідності. Головною метою даних досліджень була постановка експериментів, аналіз яких міг би підтвердити чи спростувати припущення про існування взаємно однозначної відповідності між фрактальною розмірністю мікроструктури металу та його кількісними характеристиками. Розробка методу визначення механічних властивостей металу шляхом аналізу фрактальної розмірності його складових структури доповнює існуючі методи оцінки якісних характеристик в матеріалознавстві, що дозволяє встановлювати зв'язок між структурою і механічними властивостями металу. Такий підхід дає можливість заощадити кошти, які потрібні для проведення механічних іспитів. Це визначає актуальність даної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертація пов'язана з науково-дослідною роботою кафедри матеріалознавства й обробки матеріалів, лабораторії плазмотехнології Придніпровської державної академії будівництва та архітектури і програмою "Впровадження технології напилення і складу багат шарового теплозахисного припрацьованого покриття для приставок ТВД вибору Д27" за державним реєстраційним номером 0101U006332.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертації є розробка методу визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури.

Реалізація даної мети вимагає вирішення наступних завдань:

1. Встановити взаємно однозначну відповідність між фрактальною розмірністю мікроструктури сталі та її механічними властивостями.
2. Розробити спосіб виявлення з існуючих складових структури сталі тієї складової, фрактальна розмірність якої найбільш чутлива до конкретної механічної властивості.
3. Науково обґрунтувати та розробити спосіб формалізованого опису взаємно однозначної відповідності між механічною властивістю сталі і фрактальною розмірністю структурної складової, яка найбільш чутлива до цієї характеристики.
4. Розробити метод для визначення механічних властивостей сталі з використанням аналізу фрактальної розмірності складових її структури.
5. Провести апробацію дієздатності розробленого методу та впровадити його в практику прикладного матеріалознавства.

Об'єктом дослідження являється мікроструктура низьковуглецевих та середньовуглецевих сталей і зв'язок її фрактальної розмірності з механічними властивостями.

Предметом дослідження є взаємно однозначна відповідність між механічними властивостями низьковуглецевих і середньовуглецевих сталей та фрактальною розмірністю їхньої мікроструктури.

Методи дослідження.

1. Метод визначення хімічного складу сталі та механічні випробування.
2. Метод оптичної мікроскопії для аналізу структури сталі.
3. Методика розрахунку фрактальної розмірності мікроструктури сталі, основана на збіжності клітинного та крапкового способів.
4. Метод графо-аналітичного і статистичного аналізу для одержання залежностей між фрактальними розмірностями складових структури сталі та її механічними властивостями.
5. Метод визначення механічних властивостей сталі на основі металографічного аналізу та автоматизованого розрахунку фрактальної розмірності її мікроструктури.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в розробці та дослідженні нового методу визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури, який включає:

– методика визначення фрактальної розмірності мікроструктури металу, яка заснована на визначенні області найбільш близької збіжності крапкового і клітинного способів (пат. України 51439 А);

- спосіб виявлення з існуючих складових структури сталі тієї складової, фрактальна розмірність якої найбільш чутлива до конкретної механічної властивості;
- спосіб проведення експерименту, який складається з пасивної його частини та активної;
- визначення меж самоподібності фрактальної структури для сталі СтЗпс (від $\times 100$ до $\times 500$);
- встановлення взаємно однозначної відповідності між параметрами мікроструктури (фрактальною розмірністю структури фериту, перліту, бейніту, меж зерен) Сталі №113, Сталі №115, Сталі №116 (Англія), сталі вітчизняного виробництва СтЗпс та макропараметрами (їхніми механічними властивостями);
- експериментальне підтвердження фізико-хімічної інтерпретації механізму впливу складових структури (фериту, перліту, бейніту та мартенситу) та меж їх зерен на механічні властивості металу;
- базу знань (БЗ), яка представлена у вигляді системи алгебраїчних рівнянь, що визначають відповідність якісної характеристики досліджуваного металу з фрактальною розмірністю його складових структури.

Достовірність результатів дисертації забезпечується застосуванням апробованих методів оптичної мікроскопії, методики визначення фрактальної розмірності мікроструктури металу, зіставленням отриманих результатів з відомими в літературі аналогами, задовільною погодженістю основних результатів з відповідними даними натурних обстежень.

Практичне значення одержаних результатів. Використання результатів виконаної науково - дослідницької роботи в промислових умовах та при проведенні наукових досліджень дозволяє прискорити процес проведення експрес – контролю механічних властивостей виробленого прокату, що підтверджується актом впровадження.

На основі методики розроблені лабораторні роботи, що дозволяє студентам-матеріалознавцям на практичних заняттях оперативно обчислювати фрактальну розмірність мікроструктури металу і за її значенням визначати кількісні оцінки його якісних характеристик.

Особистий внесок здобувача:

- розробка, дослідження і застосування методу визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури;
- перевірка працездатності методу, що полягає у визначенні взаємозв'язку між механічними властивостями сталей англійського виробництва: Сталі №113, Сталі №115, Сталі №116 і вітчизняної сталі СтЗпс та фрактальною розмірністю складових їхньої структури;
- проведення основного обсягу експериментальних досліджень з даної науково-дослідної роботи;

– впровадження результатів виконаної НДР в умовах ДГМК “Криворіжсталь”;

– впровадження в ПДАБтаА курсу лабораторних робіт відповідно до дисциплін:

«Математичні методи й оптимізація процесів», «Математичне планування експерименту», «Експертні системи», «Наукові методи і дослідження» для студентів спеціальності 0511, спрямованих на визначення якісних характеристик металу за допомогою аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури.

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень апробовані у доповідях на чотирьох міжнародних семінарах з моделювання й оптимізації композитів (ОДАБтаА, м. Одеса, квітень 2000-2003 р.), на п'яти всеукраїнських наукових конференціях (м. Рівне, травень 2001 - 2002 р.; м. Дніпропетровськ, квітень 2001 - 2003 р.), на міжнародній конференції "Перспективні завдання інженерної науки" (м. Алушта, липень 2002 р.), на міжнародному симпозиумі українських інженерів – механіків (Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів, травень 2003 р.), а також обговорювалися на відкритих засіданнях і семінарах кафедри матеріалознавства й обробки матеріалів (ПДАБтаА, м. Дніпропетровськ, 2000 - 2003 р.р.).

Публікації. Основні положення дисертації висвітлені в 16 публікаціях (12 з них у фахових виданнях) та одному запатентованому винаході (пат. України 51439 А).

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 150 найменувань, чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації містить 184 сторінки, що включає 113 сторінок основного тексту; 143 рисунка і 49 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми, сформульовані мета і завдання, визначені об'єкт і предмет дослідження, наукова новизна і практичне значення роботи по розробці і дослідженню методу визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури.

Перший розділ присвячено аналізу структури металів та оцінки їх якісних характеристик на основі методів електронної й оптичної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу та ін. В розділі відзначається, що традиційні методи оцінки структури металів не в змозі дати кількісну оцінку деяким структурам на різних масштабних рівнях (кластерам, дендритам, дислокаціям, мартенситним структурам та ін.). В багатьох вітчизняних та закордонних публікаціях було показано, що фрактальна розмірність являє собою кількісну характеристику структури будь-якого матеріалу. Тому в даному випадку доцільно використовувати апарат фрактальної геометрії для оцінки фрактальності

мікроструктури, оскільки, як передбачається, фрактальна розмірність кожної мікроструктури є індикатором її якісних характеристик. Якщо відповідність між фрактальною розмірністю структури металу та його якісними характеристиками, зокрема механічними властивостями буде експериментально доведена, то це дасть змогу створити метод визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури.

Показана актуальність розробки методу визначення механічних властивостей металу шляхом аналізу фрактальної розмірності фаз, меж зерен, що складають його структуру. Даний метод покликаний доповнити існуючі методи ідентифікації якісних характеристик металу з метою встановлення зв'язку між структурою і механічними властивостями металу.

Другий розділ присвячено встановленню відповідності між якісними характеристиками металу та фрактальною розмірністю складових структури і меж зерен.

Розроблено спосіб виявлення з структурних складових сталі тієї складової, фрактальна розмірність якої найбільш чутлива до конкретного показника якості. Коефіцієнт чутливості K_i визначається за формулою (1):

$$K_i = |D_i - D_{i+1}| / |X_i - X_{i+1}|, \quad (1)$$

де D_i і D_{i+1} – фрактальні розмірності структурних складових в різних точках структури металу; X_i і X_{i+1} – механічні властивості металу в цих точках.

Розроблено нову методику визначення фрактальної розмірності зображення (Пат. 51439А України). Згідно з якою визначення фрактальної розмірності одночасно ведеться клітинним і крапковим способами. Кожний з цих способів має як недоліки, так і переваги. Тому фрактальна розмірність визначається за найкращою збіжністю між ними (див. рис. 1).

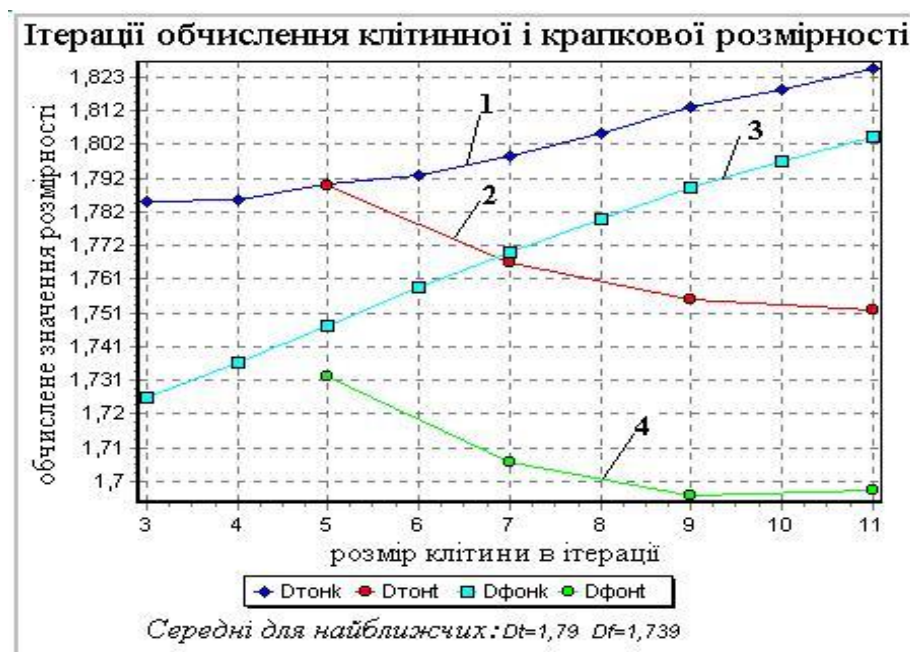


Рис.1. Обчислення фрактальної розмірності на основі клітинного і крапкового способу.

На рис.1 лінії 1 і 2 показують зміну значень фрактальної розмірності в залежності від кроку ітерації (залежно від розміру клітини, що покриває зображення мікроструктури). В тому місці, де спостерігається найбільша збіжність значень фрактальної розмірності структурних складових, яка обчислена за допомогою клітинного та крапкового способу, визначається її середня характеристика. На рис. 1 найбільша збіжність значень фрактальної розмірності структурних складових спостерігається на п'ятому кроці ітерації.

Запропоновано спосіб проведення експерименту в дві стадії: пасивний і активний експеримент. Пасивний експеримент призначений для того, щоб за існуючими у літературі аналогами, без проведення реального експерименту, перевірити припущення про можливість існування взаємно однозначної відповідності між фрактальною розмірністю і конкретною якісною характеристикою. Після підтвердження цього припущення проводиться активний експеримент. Схема проведення експериментів представлена на рис.2.



Рис.2. Схема проведення експериментів.

Пасивний експеримент був проведений на сталях англійського виробництва (Сталь №113, Сталь №115 і Сталь №116). Вибір даних марок сталей обумовлений тим, що в літературі накопичено велику кількість фотознімків структур по даним маркам сталей з відповідними механічними властивостями. Хімічний склад сталей представлений в таблиці 1.

Таблиця 1

Хімічний склад Сталі №113, Сталі №115 і Сталі №116 (Англія) по масі в %

Марка сталі	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	N
113	0,115	0,29	0,39	0,012	0,026	0,12	0,215	–	–
115	0,330	0,25	0,55	0,032	0,030	0,14	0,230	0,01	0,01
116	0,440	0,22	0,66	0,022	0,029	0,15	–	–	–

З приведених на рис.3 гістограм видно, що чутливість визначає вплив і “відображення” в чисельному значенні кожної структурної складової на твердість при заданих режимах термічної обробки.

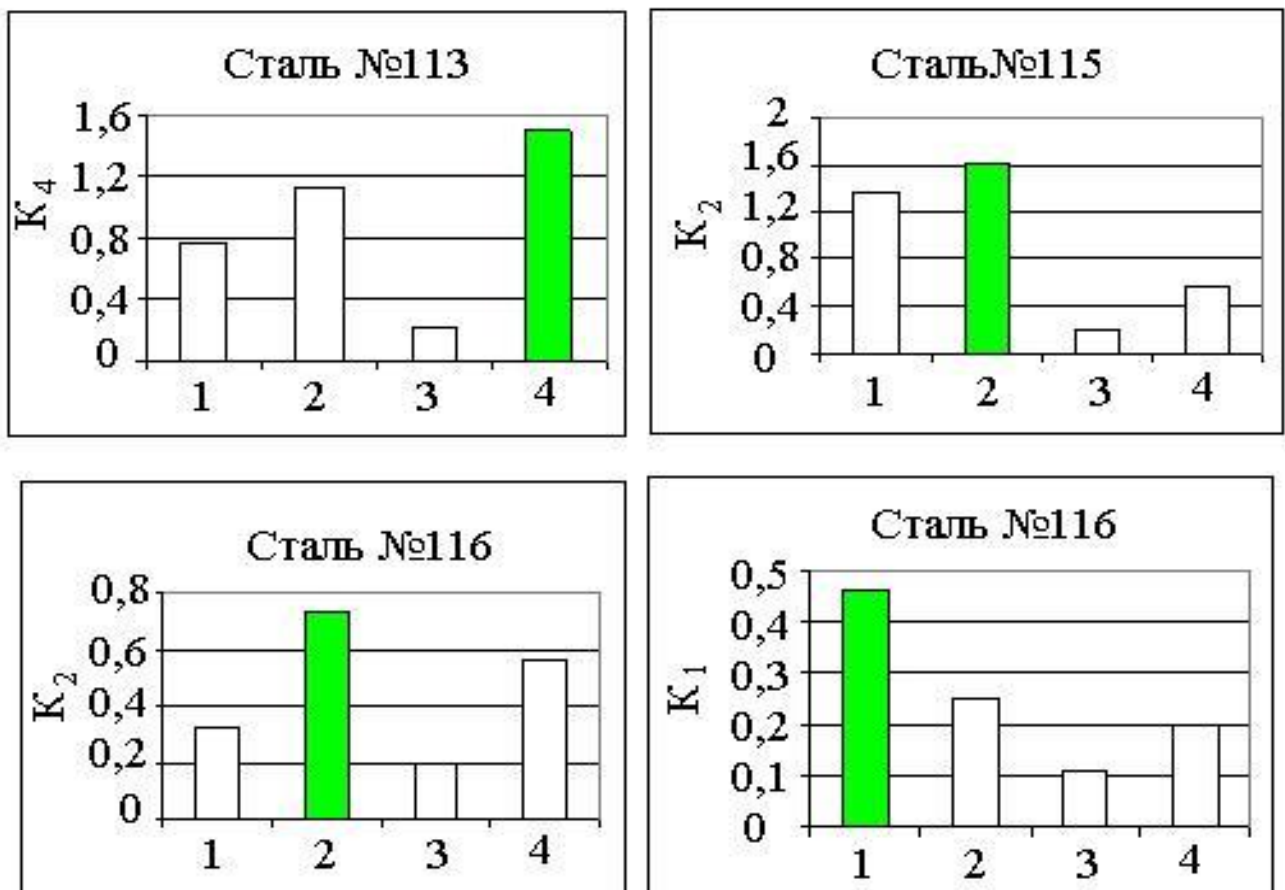


Рис.3. Гістограми чутливості фрактальної розмірності фериту (1), перліту (2), середнього значення фаз (3) і меж зерен (4) до твердості Сталі №113, Сталі №115 і Сталі №116.

Для даних марок сталей фрактальні розмірності складових мікроструктури по-різному впливають на твердість. Найбільш чутливі до твердості для Сталі №113 є фрактальні розмірності меж

зерен фериту і перліту; для Сталі №115 – фрактальна розмірність структури перліту і для Сталі №116 (отримано 2 гістограми в зв'язку з різними структурами) – фрактальна розмірність структури перліту і фериту. На основі аналізу пасивного експерименту отримана система рівнянь (2), де за функцію мети виступає твердість, а за аргументи – фрактальна розмірність тієї складової, котра найбільш чутлива до неї.

$$\begin{cases} HV = 115,08D_3^{1,1372} & \text{– для Сталі №113} \\ HV = 4394D_{\Pi}^2 - 15709D_{\Pi} + 14217 & \text{– для Сталі №115} \\ HV = 1340,8D_{\Pi}^2 - 4684,9D_{\Pi} + 4325 & \text{– для Сталі №116} \\ HV = -3005,4D_{\Phi}^2 + 10214D_{\Phi} - 8418,7 & \text{– для Сталі №116} \end{cases} \quad (2)$$

де HV – твердість по Віккерсу; D_{Φ} – фрактальна розмірність структури фериту; D_{Π} – фрактальна розмірність структури перліту; D_M – фрактальна розмірність середнього значення фериту і перліту; D_3 – фрактальна розмірність структури меж зерен.

Аналіз отриманих результатів підтверджує існування взаємно однозначної відповідності між механічними властивостями низьковуглецевих і середньовуглецевих сталей і фрактальною розмірністю їх структурних складових.

Третій розділ присвячено розробці методу визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності фаз і меж зерен.

Активний експеримент здійснювався на конструкційній сталі вітчизняного виробництва СтЗпс. Передбачається, що в структурі сталі СтЗпс інтегруються її основні складові (фази), які зустрічаються в структурі інших марок сталей, тому ми вважаємо, що подібний підхід формування рівнянь можна застосувати і на ці марки сталей.

Хімічний склад сталі СтЗпс по двом плавкам, який було відібрано на ДГМК “Криворіжсталь”, представлений в таблиці 2.

Таблиця 2

Хімічний склад сталі СтЗпс за масою в %

№ плавки	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
252776	0,16	0,07	0,61	0,009	0,022	0,02	0,02
263512	0,22	0,07	0,96	0,020	0,030	0,02	0,02

У ході даної роботи встановлено, що складові структури (ферит, перліт, бейніт, мартенсит, границі зерен) є фрактальними об'єктами в визначеному масштабному діапазоні (при її збільшенні від $\times 100$ до $\times 500$). Похибка в розрахунках фрактальної розмірності зведена до мінімуму при ви-

борі одних і тих же ділянок структури при різному її збільшенні. Похибка для зерен фериту і перліту в даному випадку складає $0,1 \div 0,3\%$. Цей факт підтверджує фрактальність мікроструктури металу, оскільки виконується одне з головних властивостей фракталу – самоподібність. Подальше збільшення ділянки поля мікроструктури (більш ніж $\times 1000$), веде до втрати інформації про її складові, для яких визначається фрактальна розмірність. Остання обставина пов'язана з появою нових структурних елементів в зернах металу.

Механічні властивості і фрактальна розмірність складових структури визначалися в трьох реперних точках. Для відтворюваності дослідів з кожної із 20 структур, отриманих за допомогою задавання різних режимів термічної обробки (нагрів до 930°C з охолодженням в воді, на повітрі, в маслі та з прискореним охолодженням в воді до $650 - 400^{\circ}\text{C}$ з інтервалом 50°C) отримано по 9 фотознімків структури ($\times 500$). В кожній реперній точці зроблено по три ударні та розривні зразки для механічних іспитів. Вибір реперних точок на структурі (Сталь Ст3пс) представлено на рис. 4.

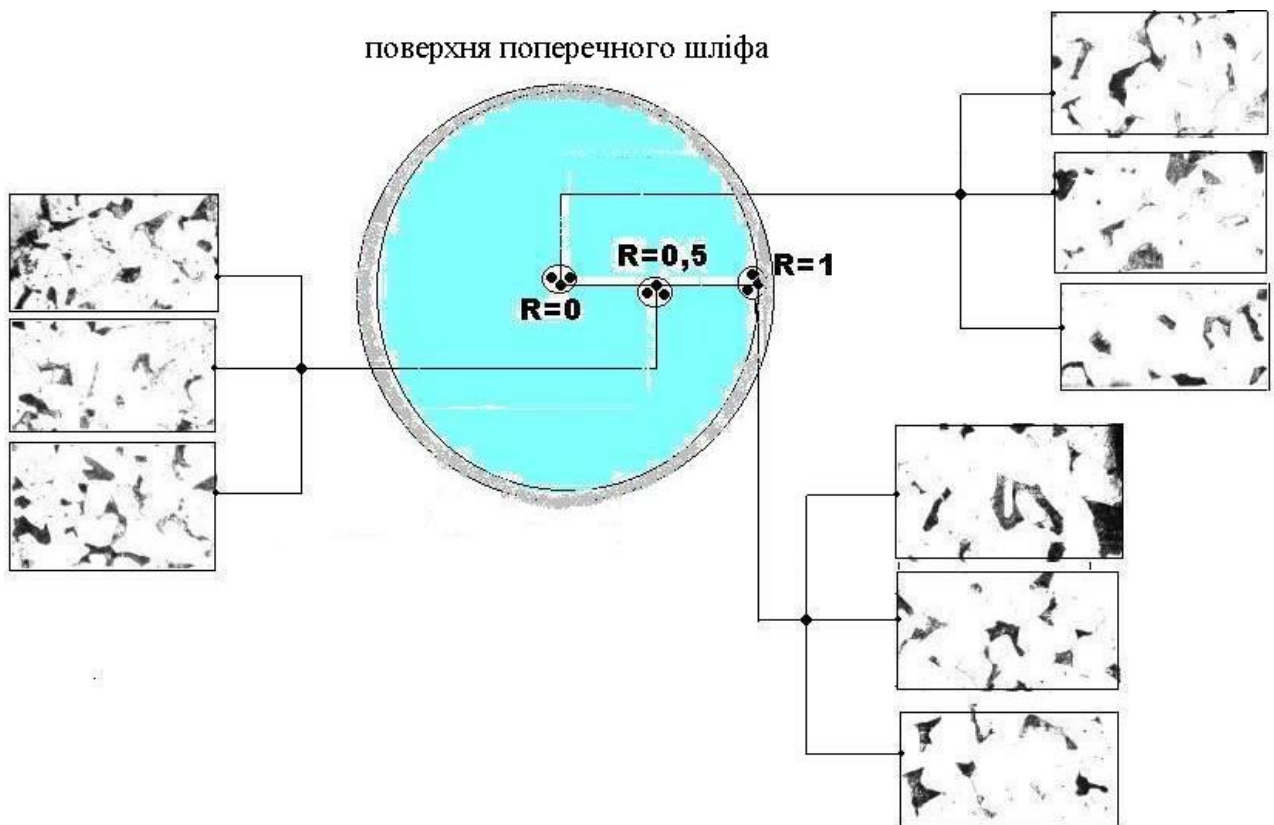


Рис.4. Вибір реперних точок на структурі сталі Ст3пс.

На рис. 5 наведена загальна схема проведення експерименту, де показано, що на його початковій стадії необхідно отримати структури, які характеризуються наявністю фериту, перліту, бейніту, мартенситу. Це досягається шляхом завдання обраних режимів термічної обробки (охолодження у воді, в маслі та на повітрі; прискорене охолодження у воді). На наступній стадії необхід-

но оцінити “відображення” в чисельному значенні складових структури кожної механічної властивості. Для цього необхідно визначити коефіцієнт чутливості (1), що представлено на рис. 5 гістограмами.

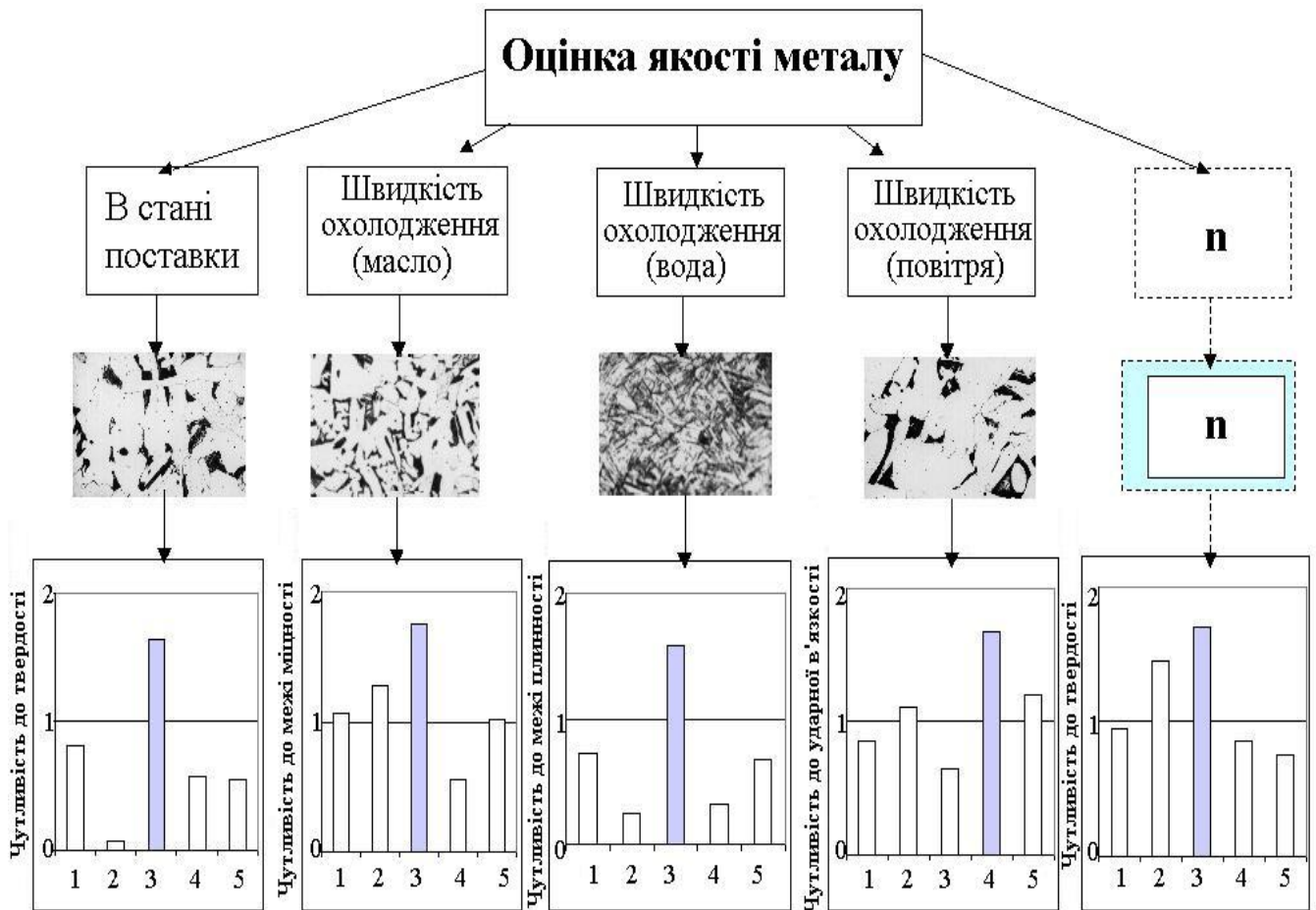


Рис.5. Загальна схема проведення експерименту на сталі Ст3пс.

На рис.5: 1 – чутливість фрактальної розмірності структури фериту до механічної властивості; 2 – чутливість фрактальної розмірності структури перліту до механічної властивості; 3 – чутливість фрактальної розмірності структури бейніту до механічної властивості; 4 – чутливість фрактальної розмірності середнього значення складових структури до механічної властивості; 5 – чутливість фрактальної розмірності меж зерен до механічної властивості.

Отримані результати активного експерименту підтверджують кореляцію фрактальної розмірності кожної структурної складової (фериту, перліту, бейніту, мартенситу, середнього значення складових структури та меж їх зерен) з конкретною механічною властивістю. При тому експериментально встановлено, що на властивості металу (твердість, межа міцності) значно впливають не тільки наявність і співвідношення фаз фериту, бейніту і мартенситу, але і конфігурація самої їх структури, яка чисельно відображена у вигляді їх фрактальної розмірності. Чутливість фрактальної розмірності фериту і меж зерен спостерігається, в основному, до властивостей, що характери-

зують пластичність. Чутливість фрактальної розмірності бейніту і мартенситу спостерігається, в основному, до механічних властивостей, що характеризують міцність.

У ході даної роботи встановлено, що фрактальна розмірність мікроструктури, яка являє собою мультифрактал і складається з фрактальної розмірності структури кожної її складової, чутлива до зміни механічних властивостей металу, що дає можливість не тільки розраховувати, але і прогнозувати якість металу.

Внаслідок виконаної роботи отримана система з 42 рівнянь, які описують механічні властивості сталі Ст3пс (круг Ø 24 мм і арматура Ø 25 мм) як функції фрактальної розмірності її мікроструктури і температури кінця прискореного охолодження у воді. Через недоцільність наведення в авторефераті всіх 42 рівнянь ми подаємо лише 7 (для реперної точки $R_1=0$ (круг Ø 24 мм)), як приклад, всі останні наведені в дисертації.

$$HV_{\Phi}^{10} = 1,9 \cdot 10^6 - 3,1 \cdot 10^6 D_{\Phi} + 1,7 \cdot 10^6 D_{\Phi}^2 - 3 \cdot 10^5 D_{\Phi}^3 + 0,6t \quad (3)$$

$$\sigma_B = 2379,9 + 234,88 D_{\Phi} - 8,17t + 0,007t^2 \quad (4)$$

$$\delta = -708,02 + 581,53 \ln D_{\Phi} + 224,69 / \ln D_{\Phi} + 5,59 \cdot 10^{-8} t^3 \quad (5)$$

$$KCU^{+20} = -3454,39 - 0,31t^{1,5} + 0,001t^2 \ln t_{\text{охл}} + 138,3(\ln t)^2 \quad (6)$$

$$HRB^{-1} = 1184,88 - 1146,76e^{t/-8199,6} - 1,03t / \ln t - 143,59 / \ln t \quad (7)$$

$$\psi = -6679 + 154,4e^{-D_{\Phi}^3} + 6667,8e^{t/-2012,63} + 18,9t / \ln t \quad (8)$$

$$\sigma_T = 1875,11 + 281,04 D_{\Phi} - 6,99t + 0,0059t^2 \quad (9)$$

де HV_{Φ}^{10} – мікротвердість фериту при навантаженні 10 г; σ_B – межа міцності; δ – відносне видовження; KCU^{+20} – ударна в'язкість; HRB – твердість по Роквеллу; ψ – відносне звуження; σ_T – межа плинності; D_{Φ} – фрактальна розмірність бейніту; t – температура кінця прискореного охолодження у воді.

На основі отриманих рівнянь створена база даних (БД), яку можна трактувати як базу знань (БЗ) тому, що кожне рівняння пояснюється з точки зору механізму досліджених явищ. БЗ представлена у вигляді системи алгебраїчних рівнянь (3 – 9), які встановлюють відповідність між якісними характеристиками металу і фрактальною розмірністю його структурної складової. Як видно з рівнянь, в якості функції мети виступає механічна властивість металу, а в якості аргументів – фрактальна розмірність структурних складових і температура кінця прискореного

охладження у воді. БЗ відрізняється від традиційних БД тим, що величезні масиви даних замієно отриманими закономірностями, за якими користувач в будь-який момент часу може не тільки розраховувати механічні властивості металу, але й прогнозувати їх.

Похибка методу визначення якісних характеристик металу за допомогою аналізу його фрактальної розмірності мікроструктури складає $2 \div 5\%$. Загальна похибка методу, із включенням похибки, що виникає при механічних іспитах, дорівнює $6 \div 8\%$.

Аналіз результатів активного експерименту підтвердив працездатність розробленого методу визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності складових його структури і меж зерен.

Експеримент показав, що розроблений метод оцінки якісних характеристик сталі СтЗпс можна застосовувати на інших марках сталей при умові створення для кожної з них власної БЗ.

Четвертий розділ присвячено практичному застосуванню метода визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури. Практичне застосування методу полягає в можливості оперативного визначення механічних властивостей металу на основі сформованої БЗ (порядку однієї години). БЗ розроблена у вигляді програми для обчислювальної машини і використана на ДГМК “Криворіжсталь” для прогнозування рівня кількісних значень характеристик нормованих механічних властивостей металопрокату із сталі СтЗпс (круг $\varnothing 24$ мм і арматура $\varnothing 25$ мм).

Розроблений метод впроваджений в навчальний процес у вигляді методичних матеріалів, що включають п'ять лабораторних робіт для студентів – матеріалознавців (ПДАБтаА, м. Дніпропетровськ). У впроваджених методичних матеріалах відбиті методи неруйнівного контролю металу, визначення його механічних властивостей за допомогою вивчення фрактальної розмірності його мікроструктури, розрахунок чутливості фрактальної розмірності складових структури, меж зерен до зміни механічних властивостей.

ВИСНОВКИ

У дисертації отримані наступні основні наукові та практичні результати.

1. Встановлено існування взаємно однозначної відповідності між фрактальною розмірністю мікроструктури сталі, яка була взята для іспитів, та її механічними властивостями.
2. Розроблено спосіб виявлення з складових структури сталі тієї складової, фрактальна розмірність якої найбільш чутлива до конкретної механічної властивості.
3. Розроблена методика обчислення фрактальної розмірності мікроструктури металу, котра базується на збіжності клітинного та крапкового способів (Патент України №51439А).

4. Отримані рівняння, у яких функцією мети виступає механічна властивість сталі СтЗпс, а аргументами рівняння є фрактальна розмірність найбільш чутливої структурної складової і температура кінця прискореного охолодження.
5. Розроблено метод визначення механічних властивостей металу з використанням аналізу фрактальної розмірності складових структури і меж зерен. Працездатність розробленого методу апробована в умовах промислового виробництва.
6. Здійснено впровадження розробленого методу на ДГМК “Криворіжсталь” та в навчальний процес ПДАБтаА.

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

1. Волчук В.Н., Петров И.Н., Дубров Ю.И. Имитационная модель трансформации цементного геля // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Вып. 10 “Стародубовские чтения 2000” / Под общ. ред. д.т.н., проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2000. – С. 220 (автору належить формалізація основних етапів моделі росту фрактального кластера цементного гелю).
2. Дубров Ю.И., Волчук В.Н. Пути применения моделей фрактальных кластеров в прогнозировании качества материалов // Рациональный эксперимент в материаловедении: Материалы к 39-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса: АстроПринт, 2000. – С. 29-30 (автору належить аналітичний опис моделі росту фрактального кластера).
3. Дубров Ю.И., Волчук В.Н., Дейнеко Л.Н., Большаков В.И. Фрактальные структуры материалов и прогноз их качественных характеристик. // Математика, компьютер, образование: Сб. науч. трудов.–Вып. 8. /Под ред. Г.Ю Резниченко. Ч.2. – М.: Прогресс-Традиция, 2001. – С.502-506 (автору належить апробація математичної моделі при визначеному рівні службових характеристик металопрокату з маловуглецевих марок сталей).
4. Дубров Ю.И., Волчук В.Н., Криулин Ф.В., Дейнеко Л.Н., Чайковский О.А., Большаков В.И. Прогнозирование качественных характеристик материалов методом вычисления фрактальной размерности их микроструктуры // Бернштейновские чтения: Сб. науч. трудов по термомеханической обработке металлических материалов, посвященных 30-летию лаборатории ТМО МИСиС. – М.: МИСиС, 2001. – С. 34 (автору належить участь в розробці методу визначення фрактальної розмірності микроструктури маловуглецевої сталі з врахуванням перенормування зображення для ПЕОМ).

5. Дубров Ю.И., Волчук В.Н., Большаков В.И. Применение экспертной информации при формировании активного эксперимента в материаловедении // Моделирование и оптимизация в материаловедении: Материалы к 40-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса: АстроПринт, 2001. – С. 25-26 (автору належить участь в розробці методу обробки експертної інформації).
6. Большаков В.И., Волчук В.Н., Дейнеко Л.Н., Дубров Ю.И. Композиция метода планирования экстремальных экспериментов и экспертной информации для формирования системы прогноза качества материалов // Перспективные задачи инженерной науки: Сб. науч. трудов международной конференции. – Вып. 2. / Под общ. ред. акад. МИА, д.т.н., проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: GAUDEAMUS, 2001 – С. 203-208 (автору належить апробація методу визначення фрактальної розмірності мікроструктури металу з врахуванням перенормування зображення для ПЕОМ).
7. Большаков В.И., Волчук В.Н., Дубров Ю.И., Дейнеко Л.Н., Криулин Ф.В. Фрактальная размерность материала как критерий оценки его основных качественных характеристик // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Вып. 12 “Стародубовские чтения 2001” / Под об. ред. д.т.н., проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2001. – С. 109-113 (автору належить участь в розробці методу формування єдиного критерію для прогнозу якісних характеристик металу).
8. Голобородько С.С., Петрусенко Р.В., Волчук В.Н. Некоторые пути формирования математической модели качественных характеристик металлов // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Вып. 12 “Стародубовские чтения 2001” / Под общ. ред. д.т.н., проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2001. – С. 113-114 (автору належить вибір оптимального методу математичної моделі якісних характеристик металу).
9. Волчук В.Н., Дубров Ю.И. Опыт применения расчета фрактальных размерностей для анализа основных качественных характеристик материалов // Актуальні проблеми підготовки фахівців в умовах реструктуризації органів регіонального управління: Зб. наук. праць. – Вып. 2(9). – Рівне: Вісник РДТУ, 2001. – С. 357-362 (автору належить розробка та апробація методики росту фрактального кластера).
10. Большаков В.И., Волчук В.Н., Дубров Ю.И. Фрактальная размерность микроструктуры материала как функция его качественных характеристик // Прогнозирование в материаловедении: Материалы к 41-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов. – Одесса: АстроПринт, 2002. – С. 115-116 (автору належить модернізація методу розрахунку

фрактальної розмірності мікроструктури).

11. Волчук В.Н. Фрактальная размерность как индикатор качественных характеристик материалов // Перспективные задачи инженерной науки: Сб. науч. трудов международной конференции. – Вып. 3. /Под общ. ред. акад. МИА, д.т.н., проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: GAUDEAMUS, 2002 – С. 144-147 (автору належить аналіз сучасних методів визначення якісних характеристик металу з визнанням необхідності створення методу їхнього визначення на основі оцінки фрактальної розмірності мікроструктури).
12. Большаков В.И., Волчук В.Н., Дубров Ю.И., Дейнеко Л.Н., Грачова В.М. Определение качественных характеристик металлов после термообработки на основе анализа фрактальной размерности их микроструктуры // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Вып. 15. Ч.1 “Стародубовские чтения 2002” /Под общ. ред. д.т.н., проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2002. – С. 56-60 (автору належить апробація методу визначення якісних характеристик металу після термічної обробки на основі аналізу фрактальної розмірності мікроструктури на прикладі сталі Ст3пс).
13. Большаков В.И., Дубров Ю.И., Волчук В.Н. Определение качественных характеристик материалов путем изучения фрактальной размерности микроструктуры их симметричных образцов // Актуальні проблеми підготовки фахівців в умовах реструктуризації органів регіонального управління: Зб. наук. праць. – Вип. 2(15). – Рівне: Вісник РДТУ, 2002. – С. 554-559 (автору належить апробація методу визначення якісних характеристик металічних симетричних зразків на основі аналізу фрактальної розмірності мікроструктури на прикладі сталі Ст3пс).
14. Пат. 51439А України, G06K9/00. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображення 9/В.І. Большаков, Ю.І. Дубров, Ф.В. Криулін, В.М. Волчук. – Зареєстр. 02.04.02: Опубл. 15.11.02, Бюл. №11 (автору належить розробка способу визначення фрактальної розмірності зображення, який заснований на визначенні області найбільш близької збіжності крапкового і клітинного способу).
15. Большаков В.И., Волчук В.Н., Дубров Ю.И., Грачева В.М. К определению фрактальности микроструктуры материала // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры. – Вып. 22. Ч.1 “Стародубовские чтения 2003” /Под общ. ред. д.т.н., проф. В.И. Большакова. – Днепропетровск: ПГАСиА, 2003. – С. 160-164 (автору належить визначення меж самоподібності структурних складових сталі Ст3пс на предмет причетності їх до фрактальних структур).
16. Большаков В.И., Волчук В.Н., Дубров Ю.И. Мультифрактальность микроструктуры материала и его физико-механические свойства. // Моделирование и оптимизация в материаловедении:

Матеріали к 42-му міжнародному семінару по моделюванню и оптимізації композитов. – Одеса: АстроПринт, 2003. – С. 146-148 (автору належить оцінка мікроструктури металу як мультифракталу).

17. Большаков В.І., Волчук В.М., Дубров Ю.І. Шляхи відстежування трансформацій мікроструктури матеріалу, які відбуваються внаслідок його зносу // Шостий міжнародний симпозіум українських інженерів–механіків у Львові: Тези доповідей. /За заг. ред. к.т.н., доц. Б.І. Кіндрацького.– Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2003. – С. 145-146 (автору належить ідея використання методики аналізу фрактальної розмірності мікроструктури металу в трибології).

АНОТАЦІЯ

Волчук В.М. Розробка і дослідження методу визначення якісних характеристик металу на основі аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури. Рукопис.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 - Матеріалознавство. – Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпропетровськ, 2004.

Дисертаційна робота присвячена розробці методу визначення якісних характеристик металу шляхом аналізу фрактальної розмірності його мікроструктури. Такий підхід дозволяє встановлювати зв'язок між мікроструктурою і механічними властивостями металу без проведення механічних іспитів. Реалізація методу дає можливість заощадити кошти, які потрібні для проведення механічних іспитів.

Розроблено спосіб виявлення з існуючих складових структури сталі тієї складової, фрактальна розмірність якої найбільш чутлива до конкретного показника якості. Апробація методу була здійснена на сталях англійського виробництва (Сталь №113, Сталь №115 і Сталь №116).

Розроблено нова методика визначення фрактальної розмірності зображення мікроструктури (Пат. 51439А України).

Створено БЗ для розрахунку механічних властивостей сталі Ст3пс по фрактальній розмірності її мікроструктури і температури кінця прискореного охолодження (для круга Ø 24 мм і арматури Ø 25 мм). Відзначається, що даний метод може бути застосований для визначення механічних властивостей різних металів.

Похибка запропонованого методу складає $2 \div 5\%$. Загальна похибка методу, із врахуванням похибок, які виникають при механічних іспитах, складає $6 \div 8\%$.

Метод впроваджений у навчальний процес у ПДАБтаА (м. Дніпропетровськ) для студентів–матеріалознавців у вигляді методичних матеріалів, що включають п'ять лабораторних робіт.

Ключові слова: фрактал, фрактальна розмірність, мультифрактал, якісні характеристики, механічні властивості, чутливість, метод.

АННОТАЦІЯ

Волчук В.М. Разработка и исследование метода определения качественных характеристик металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры. Рукопись.

Диссертация на получение ученой степени кандидата технических наук за специальностью 05.02.01 - Материаловедение. - Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, Днепропетровск, 2004.

Диссертационная работа посвящена разработке метода определения качественных характеристик металла путем анализа фрактальной размерности его микроструктуры. Такой подход позволяет устанавливать связь между микроструктурой и механическими свойствами металла без проведения механических испытаний. Реализация метода приводит к материальным сбережениям, которые необходимы для проведения механических испытаний.

Первый раздел посвящен анализу основных методов электронной и оптической микроскопии, рентгеноструктурного анализа, методов определения механических свойств. Рассматривается современное состояние исследования проблемы оценки качественных характеристик металла. Обсуждается необходимость разработки метода определения качественных характеристик металла путем анализа фрактальной размерности составляющих его структуры.

Второй раздел посвящен установлению соответствия между качественными характеристиками металла и фрактальной размерностью структурных составляющих, границ зерен.

Разработан способ выявления среди составляющих структуры стали той составляющей, фрактальная размерность которой наиболее чувствительная к конкретному показателю качества. Апробация метода была осуществлена на сталях английского производства (Сталь №113, Сталь №115 и Сталь №116).

Установлено взаимно однозначное соответствие между механическими свойствами Стали №113, Стали №115, Стали №116 и фрактальной размерностью ее структурных составляющих, границами зерен.

Разработана новая методика определения фрактальной размерности изображения микроструктуры (Пат. 51439А Украины).

Третий раздел посвящен разработке метода определения качественных характеристик металла на основе анализа фрактальной размерности структурных составляющих и границ зерен, что дает возможность проводить экспресс – контроль механических свойств металлопроката.

Установлено взаимно однозначное соответствие между механическими свойствами Стали СтЗпс, фрактальной размерностью ее структурных составляющих, границами зерен.

Создана БЗ для расчета механических свойств Стали СтЗпс по фрактальной размерности ее микроструктуры и температуры конца ускоренного охлаждения (для круга Ø 24 мм и арматуры Ø 25 мм). Отмечается, что данный метод может быть применен для определения механических свойств различных металлов.

Погрешность предложенного метода составляет $2 \div 5\%$. Общая погрешность метода, с учетом погрешностей, которые возникает при механических испытаниях, составляет $6 \div 8\%$.

В четвертом разделе рассматривается реализация метода определения качественных характеристик металла на основе анализа фрактальной размерности его микроструктуры. Создана программа для вычислительной машины и использованная на ГГМК “Криворожсталь” для прогноза уровня количественных характеристик нормированных механических свойств металлопроката (Сталь СтЗпс, круг Ø24 мм и арматура Ø25 мм).

Метод введен в учебный процесс в ПГАСиА (г. Днепропетровск) для студентов-материаловедов в виде методических материалов, которые включают пять лабораторных работ.

Ключевые слова: фрактал, фрактальная размерность, мультифрактал, качественные характеристики, механические свойства, чувствительность, метод.

THE SUMMARY

Volchuk V.N. Development and investigation of a method of determination of qualitative characteristics of a metal by analyzing the fractal dimension of its microstructure. The manuscript.

The dissertation on completion of a scientific degree of a candidate of engineering on the speciality 05.02.01 – Materials Science. – Pridneprovsk State Academy of Construction and Architecture, Dniepropetrovsk, 2004.

The thesis is devoted to development of a method of determination of qualitative characteristics of a metal by analyzing the fractal dimension of its composite parts of its microstructure. Such an approach allows to relate the microstructure and the mechanical properties without making an mechanical tests. Realization of the method leads to the saving means and time needed to carry out mechanical tests.

It is discovered one-to-one correspondence between mechanical properties of the steel 113, the steel 115, the steel 116 and the phase's and grain's boundary fractal dimension.

A new method of determining of fractal dimension of microstructure image is worked out (Patent no. 51439A, Ukraine).

A data base for calculating mechanical properties of the steel 113 using the fractal dimension of its microstructure and the temperature of the end of accelerated cooling (round-shape rolling with diameter 24 mm and reinforced rolling bars with diameter 25 mm) is created. It is noted that the method can be used for determination of other metal's properties.

According to the estimations the method's error is 2–5%. The general error of the method, including mechanical test's error, is 6–8%.

The method has been introduced into the educational course at PSACEA (Dnepropetrovsk) for materials science students in the form of the methodical materials including five practical tasks.

Keywords: fractal, fractal dimension, multifractal, qualitative characteristics, mechanical properties, sensibility, method.