

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Фізико-математичний факультет
Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів

«На правах рукопису»
УДК 620.193:621.791

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

Віталій КОТОВСЬКИЙ

(підпис) (ім'я, прізвище)

“ ” _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 104 – фізика та астрономія

Освітньо – професійна програма «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

На тему: «Застосування фрактального аналізу як одного із методів дослідження металевих конструкцій»

Виконав: студент другого (магістерського) рівня вищої освіти, групи ОФ-1 Імп
(шифр групи)

Короленко Данило Юрійович

(ПІБ)

(підпис)

Науковий керівник ст. викл., к.т.н. Штофель О. О.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

Консультант “Фрактальне уявлення світу” д.т.н., наук. співр., ст. Головка В. В.

(назварозділу)

(науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

Рецензент наук. співр., к.ф.-м.н. Красікова І. Є.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ПІБ)

(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2022 року

АНОТАЦІЯ

ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ

СТУДЕНТА ФМФ, другого (магістерського) рівня вищої освіти, гр. ОФ-71мп

Короленка Данила Юрійовича

(ПІБ)

На тему: «Застосування фрактального аналізу як одного із методів дослідження металевих конструкцій»

Науковий керівник: к.т.н., ст. викл., н.с. Ольга Штофель

(науковий ступінь, вчене звання, посада, ПІБ)

Актуальність: Не проводячи високовартісних спеціальних випробувань, а лише використовуючи фрактальний підхід, виникає реальна можливість визначити і спрогнозувати експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема в діючих конструкціях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами кафедри: Розробка числової моделі впливу параметрів неметалевих включень на фрактальні показники структури (Розділ 3.1. Розробка компютеризованих програм з фрактальної параметризації структури металу зварних швів.) відділу №10 ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ.

Об'єкт дослідження: Шліф із металу зварного з'єднання.

Предмет дослідження: Виявлення взаємозв'язку механічних характеристик із структурними особливостями, зокрема з фрактальною розмірністю D .

Мета роботи: Метою науково-дослідної роботи є виявлення взаємозв'язків фрактальних розмірностей структурних параметрів D і фізико-механічних характеристик (ударної в'язкості, границь плинності та міцності) матеріалу із сталі 09Г2.

Методи дослідження: Короткочасні випробування циліндричних і плоских зразків на одновісний розтяг були виконані при кімнатній температурі на установці Instron 8802 згідно ГОСТ 1497-84. Швидкість переміщення рухомого захвату машини 10,0 мм/хв.

Металографічні дослідження мікроструктури шліфів здійснено на мікроскопі НЕОРНОТ-32зі застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS.

Відомості про обсяг роботи, кількість ілюстрацій, таблиць, додатків і літературних найменувань за переліком використаних 81 сторінок, 29 ілюстрацій, 9 таблиці, 4 додатки, 56 найменувань літератури.

Мета індивідуального завдання, використані методи та отримані результати: Вивчення структури металу та дослідження структурної складової – границі зерен та включень методом фрактального аналізу. Методи досліджень: фрактальний і аналітичний (ImageJ, Fraktal)

Висновок: Отримані результати мають важливе значення у задачах контролю якості зварних з'єднань. Отримані зв'язки ударної в'язкості, границь міцності та плинності із фрактальною розмірністю для сталі 09Г2 дають можливість подальшого розвитку методу фрактального аналізу для питань діагностики.

Перелік ключових слів (не більше 20) фрактал, фрактальний аналіз, фрактальна розмірність, мікроструктура, структуроутворення, фрактографія поверхні руйнування, методи дослідження, діагностика матеріалу.

Підпис керівника



SUMMARY

TO THE REPORT TO SCIENTIFIC AND RESEARCHING PRACTICE

STUDENT OF FMF, 2 COURSE OF THE MASTER LEVEL, GR. OF- OF-11mp

Korolenko Danylo Yurievich

(FULL NAME)

On the topic: "Application of fractal analysis as one of the methods of research of metal structures"

Scientific supervisor: Olha Shtofel Senior Teacher, Ph.D

(scientific degree, academic status, position, FULL NAME)

Topicality: Without conducting expensive special tests, but only using the fractal approach, there is a real opportunity to determine and predict the performance characteristics of materials, in particular in existing structures.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes cathedra: Development of a numerical model of the influence of parameters of non-metallic inclusions on fractal structure parameters (Section 3.1. Development of computerized programs for fractal parameterization of the structure of the metal of welds.) of the Department No. 10 of the E.O. Paton Institute of EME of NASU.

Object of research: Metal samples of the welded joint of steel 09G2.

Subject of research: Detection of the relationship between mechanical characteristics and structural features, in particular with the fractal dimension D.

Purpose of work: The purpose of the research work is to identify the relationships between the fractal dimensions of the structural parameters D and the physical and mechanical characteristics (impact strength, yield strength, and strength) of the 09G2 steel material.

Research methods: Short-term uniaxial tensile tests of cylindrical and flat specimens were performed at room temperature on an Instron 8802 machine according to GOST 1497-84. The speed of movement of the movable gripper of the machine was 10.0 mm/min.

Metallographic studies of the microstructure of the grinds were carried out on a microscope NEOPHOT-32 with the use of a digital camera OLYMPUS.

Information about the volume of the report, the number of illustrations, tables, applications and literary names in the list of used ones: 81 pages, 29 illustrations, 9 tables, 4 appendix, 56 titles of literature. The purpose of the individual task, the methods used and the results obtained.

The purpose of the individual task, the methods used and the results obtained: Study of the structure of the metal and investigation of the structural component - the boundaries of grains and inclusions by the method of fractal analysis. Research methods: fractal and analytical (ImageJ, Fraktal)

Conclusion: The obtained results are important in the tasks of quality control of welded joints. The obtained relations of impact toughness, strength and yield strength with fractal dimension for steel 09G2 provide an opportunity for further development of the fractal analysis method for diagnostic issues.

Keyword list (no more than 20))fractal, fractal analysis, fractal dimension, microstructure, structure formation, fractography of fracture surface, research methods, material diagnostics.

Signature of the head

A handwritten signature in blue ink on a black background. The signature is stylized and appears to consist of several interconnected loops and lines, possibly representing the initials 'JH' or similar.

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет фізико-математичний
(повна назва)

Кафедра загальної фізики та моделювання фізичних процесів
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерне моделювання фізичних процесів»

Спеціальність 104 – фізика та астрономія

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Віталій КОТОВСЬКИЙ

(підпис) (ім'я, прізвище)

«__» _____ 20__ р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Короленку Данилу Юрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)**

1. Темадисертації: «Застосування фрактального аналізу як одного із методів дослідження металевих конструкцій»

Науковий керівник дисертації: **к.т.н, ст. викл., Штофель О. О.**

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджено наказом по університету від 07.11.2022 р. №4071-с

2. Строк подання студентом дисертації 13.12.2022

3. Об'єкт дослідження: Шліф із металу зварного з'єднання.

4. Предмет дослідження: Виявлення взаємозв'язку механічних характеристик із структурними особливостями, зокрема з фрактальною розмірністю.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити (мінімум 4)

1. Здійснити теоретичний аналіз можливості використання фрактального методу для дослідження металевих конструкцій.
2. Виявити взаємозв'язки фрактальних розмірностей структурних параметрів D і фізико-механічних характеристик (ударної в'язкості, границь плинності та міцності) матеріалу із сталі 09Г2.
3. Дослідити зв'язок структурних параметрів із механічними характеристиками зразків із сталі 09Г2.
4. Здійснити теоретичний аналіз підходів (досліджень) до вивчення структурних складових металу та охарактеризувати роль границь зерен та неметалічних включень, які впливають на механічні характеристики матеріалу.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: рисунків – 29, таблиць – 9.

7. Перелік публікацій:

1. Головка В. В., Штофель О.О., Короленко Д.Ю. (2022). Пришвидчений метод обрахунку неметалічних включень на шліфі XI Міжнародна науково-практична конференція «Actual problems of learning and teaching methods», 06- 09 грудня 2022 р., Відень, Австрія

<https://isg-konf.com/uk/actual-problems-of-learning-and-teaching-methods/>

2. Штофель Ольга Олександрівна, Короленко Данило Юрійович, Головка Віктор Володимирович “Вирішення питання тривалості обробки даних у задачах металознавства”,

Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 72): матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції,

(м. Тернопіль, Україна – м. Переворськ, Польща, 15-16 листопада 2022 р.)

/ [редкол. : О. Патряк та ін.] ; ГО “Наукова спільнота”; WSSG w Przeworsku. – Тернопіль : ФО-П Шпак В.Б.

<https://ojs.ukrlgos.in.ua/index.php/mcnd/issue/view/03.12.2021/675>

3. Короленко Д. Ю., Науковий керівник: Штофель О.

О. (2021). Фрактальний аналіз та його можливості у задачах металознавства. Наукові тренди постіндустріального суспільства: матеріали II Міжнародної наукової конференції (Т.2), м.Запоріжжя, 3 грудня, 2021р. / Міжнародний центр наукових досліджень. —Вінниця: Європейська наукова платформа, 2021. —136с. ISBN 978-617-8037-16-1 ISBN 978-617-8037-18-5 (ТОМ 2) DOI10.36074/mcnd-03.12.2021, 2021, 106-108.

<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-719/>

8. Консультанти розділів дисертації

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 3-4 | ст. наук. співр., д.т.н. Головка В. В | 20.12.2021 | 20.11.2022 |
| | | | |

9. Дата видачі завдання 01.09.2021

Календарний план

| № з/п | Назва етапів виконання магістерської дисертації | Строк виконання етапів магістерської дисертації | Примітка |
|-------|---|---|----------|
| 1 | Проходження інструктажу з техніки безпеки та охорони праці | 15.09.2021 | |
| 2 | Ознайомлення з місцем роботи | 15.09.2021 | |
| 3 | Вивчення літературних джерел, складання огляду літератури | 06.08.2021-05.12.2022 | |
| 4 | Пошук і добір фактичних матеріалів, їх групування | 06.08.2021-01.12.2022 | |
| 5 | Наукові дослідження за темою МД | 06.08.2021-01.12.2022 | |
| 6 | Аналіз отриманих результатів | 06.08.2021-01.12.2022 | |
| 7 | Підготовка розділів МД на основі отриманих даних по темі МД | 06.08.2021-01.12.2022 | |
| 8 | Підготовка звіту з МД та оформлення презентацій до захисту | 06.08.2021-06.12.2022 | |
| 9 | Надання роботи на перевірку керівнику МД | 06.12.2022 | |
| 10 | Отримання відгуку від керівника МД | 07.12.2022 | |
| 11 | Перевірка МД на плагіат | 01.12.2022 | |
| 12 | Формування плану публікацій по темі МД або документів по впровадженню (лист з | 02.12.2022 | |

| | | | |
|----|--|-----------------------|--|
| | підприємства або подання проекту впровадження в «КПІ ім. Ігоря Сікорського») | | |
| 13 | Подання МД на рецензію | 5.12.2022 | |
| 14 | Здача МД на нормо-контроль (додержання вимог до оформлення МД) | 14.12.2022 | |
| 15 | Попередній захист МД | 06.12.2022 | |
| 16 | Виправлення матеріалу МД згідно з зауваженнями комісії на попередньому захисті | 07.12.2022-13.12.2022 | |
| 17 | Здача МД (друкований та електронний варіанти), Відгуку та Рецензії на кафедрі загальної фізики та МФП | 16.12.2022 | |
| 18 | Відправка анотації МД на сайт кафедри загальної фізики та МФП | 16.12.2022 | |
| 19 | Остаточний захист МД | 20.12.2022 | |
| 20 | Відправка матеріалів МД у бібліотеку «КПІ ім. Ігоря Сікорського» та сайт кафедри загальної фізики та ФТТ | 20.12.22 | |

Студент


(підпис)

Корольченко Д.Ю.
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації



(підпис)

О. О. Штофель
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Актуальність теми: Не проводячи високовартісних спеціальних випробувань, а лише використовуючи фрактальний підхід, виникає реальна можливість визначити і спрогнозувати експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема в діючих конструкціях.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами: Розробка числової моделі впливу параметрів неметалевих включень на фрактальні показники структури (Розділ 3.1. Розробка компютеризованих програм з фрактальної параметризації структури металу зварних швів.) відділу №10 ІЕЗ ім. Є. О. Патона НАНУ.

Об'єкт дослідження: Шліф із металу зварного з'єднання.

Предмет дослідження: Виявлення взаємозв'язку механічних характеристик із структурними особливостями, зокрема з фрактальною розмірністю D .

Мета роботи: Метою науково-дослідної роботи є виявлення взаємозв'язків фрактальних розмірностей структурних параметрів D і фізико-механічних характеристик (ударної в'язкості, границь плинності та міцності) матеріалу із сталі 09Г2.

Методи дослідження: Короточасні випробування циліндричних і плоских зразків на одновісний розтяг були виконані при кімнатній температурі на установці Instron 8802 згідно ГОСТ 1497-84. Швидкість переміщення рухомого захвату машини 10,0 мм/хв.

Задачі дослідження

1. Здійснити теоретичний аналіз можливості використання фрактального методу для дослідження металевих конструкцій.
2. Виявити взаємозв'язки фрактальних розмірностей структурних параметрів D і фізико-механічних характеристик (ударної в'язкості, границь плинності та міцності) матеріалу із сталі 09Г2.
3. Дослідити зв'язок структурних параметрів із механічними характеристиками зразків із сталі 09Г2.

4. Здійснити теоретичний аналіз підходів (досліджень) до вивчення структурних складових металу та охарактеризувати роль границь зерен та неметалічних включень, які впливають на механічні характеристики матеріалу.

Наукова новизна одержаних результатів: Вперше встановлено кореляційні залежності, які пов'язують фізико-механічні характеристики сталі 09Г2 із фрактальними розмірностями.

Показано, що існує залежність фрактальної розмірності із ударною в'язкістю, середнім розміром зерна та межами міцності та текучості.

Вперше для сталі 09Г2 встановлено кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю KCV при -40°C до 20°C , а також границями плинності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B .

Практичне значення одержаних результатів: Отримані в роботі результати і встановлені зв'язки мають практичний інтерес для експрес прогнозування причин руйнування об'єктів із сталі.

Апробація результатів дисертації

Результати дослідження апробіровані в опублікованих матеріалах (нижче наведені публікації автора).

Публікації автора:

Головко В. В., Штофель О.О., Короленко Д.Ю. (2022). Пришвидчений метод обрахунку неметалічних включень на шліфі XI Міжнародна науково-практична конференція «Actual problems of learning and teaching methods», 06-09 грудня 2022 р., Відень, Австрія

<https://isg-konf.com/uk/actual-problems-of-learning-and-teaching-methods/>

Штофель Ольга Олександрівна, Короленко Данило Юрійович, Головко Віктор Володимирович
Вирішення питання тривалості обробки даних у задачах металознавства,

Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 72): матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції,

(м. Тернопіль, Україна – м. Переворськ, Польща, 15-16 листопада 2022 р.) / [редкол. : О. Патряк та ін.] ; ГО “Наукова спільнота”; WSSG w Przeworsku. –

Тернопіль : ФО-П Шпак В.Б.
<https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/mcnd/issue/view/03.12.2021/675>

Короленко Д. Ю., Науковий керівник: Штофель О. О. (2021). Фрактальний аналіз та його можливості у задачах металознавства. Наукові тренди постіндустріального суспільства: матеріали II Міжнародної наукової конференції (Т.2), м.Запоріжжя, 3 грудня, 2021р. / Міжнародний центр наукових досліджень. —Вінниця: Європейська наукова платформа, 2021. — 136с. ISBN 978-617-8037-16-1 ISBN 978-617-8037-18-5 (ТОМ 2) DOI10.36074/mcnd-03.12.2021, 2021, 106-108.

<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-719/>

Ключові слова:фрактал, фрактальний аналіз, фрактальна розмірність, мікроструктура, структуроутворення, фрактографія поверхні руйнування, методи дослідження, діагностика матеріалу.

В роботі наведено: використаної літератури - 56, сторінок: - 81, рисунки таблиць – 9.

ABSTRACT

Actuality of theme: Without conducting expensive special tests, but only using the fractal approach, there is a real opportunity to determine and predict the performance characteristics of materials, in particular in existing structures.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes: Development of a numerical model of the influence of parameters of non-metallic inclusions on fractal structure parameters (Section 3.1. Development of computerized programs for fractal parameterization of the structure of the metal of welds.) of the Department No. 10 of the E.O. Paton Institute of EME of NASU.

Object of research: Metal samples of the welded joint of steel 09G2.

Subject of research: Detection of the relationship between mechanical characteristics and structural features, in particular with the fractal dimension D .

Purpose of work: The purpose of the research work is to identify the relationships between the fractal dimensions of the structural parameters D and the physical and mechanical characteristics (impact strength, yield strength, and strength) of the 09G2 steel material.

Research methods: Short-term uniaxial tensile tests of cylindrical and flat specimens were performed at room temperature on an Instron 8802 machine according to GOST 1497-84. The speed of movement of the movable gripper of the machine was 10.0 mm/min.

Tasks of research:

1. To carry out a theoretical analysis of approaches (studies) to the study of structural components of metal and characterize the role of grain boundaries and non-metallic inclusions that affect the mechanical characteristics of the material.
2. To reveal the structural-textural dependence with mechanical properties by method of metallographic analysis and fractal analysis.
3. To investigate the relationship between structural parameters and mechanical characteristics of samples of steel 09G2.
4. To carry out a theoretical analysis of approaches (studies) to the study of structural components of the metal and characterize the role of grain boundaries and non-metallic inclusions that affect the mechanical characteristics of the material.

Scientific novelty of the results:For the first time correlation dependences connecting physical and mechanical characteristics of 09G2 steel with fractal dimensions are established.

It is shown that there is a dependence of fractal dimension with impact strength, average grain size and tensile strength and yield strength.

For the first time for steel 09G2 the correlation dependences of average fractal dimension of grain boundaries with impact toughness KCV at -40°C to 20°C , as well as yield strength $\sigma_{0.2}$ and strength σ_B were established.

The practical significance of the results:The results obtained in the work and the established relationships are of practical interest for rapid prediction of the causes of destruction of steel objects.

Approbation of the results of the dissertation:

The results of the study are tested in published materials (below are the author's publications).

Publications:

Golovko V.V., Shtofel O.O., Korolenko D.Y. (2022). Accelerated method of calculation of non-metallic inclusions on grinding XI International Scientific and Practical Conference "Actual problems of learning and teaching methods", December 06- 09, 2022, Vienna, Austria
<https://isg-konf.com/uk/actual-problems-of-learning-and-teaching-methods/>

Shtofel Olha Oleksandrivna, Korolenko Danylo Yuriiovich, Holovko Viktor Volodymyrovych Solving the problem of data processing duration in the problems of metallurgy,
Information society: technological, economic and technical aspects of formation (issue 72): materials of the International scientific Internet conference, (Ternopil, Ukraine - Przeworsk, Poland, November 15-16, 2022) / [editors: O. Patryak et al: FO-P Shpak V.B.
<https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/mcnd/issue/view/03.12.2021/675>

Korolenko D. Y., Scientific supervisor: Shtofel O. O. (2021). Fractal analysis and its possibilities in the problems of metallurgy. Scientific trends of post-industrial society: materials of the II International Scientific Conference (Vol. 2), Zaporizhzhia, December 3, 2021 / International Center for Scientific Research:

European Scientific Platform, 2021. -136 pp. ISBN 978-617-8037-16-1 ISBN 978-617-8037-18-5 (Volume 2) DOI10.36074/mcnd-03.12.2021, 2021, 106-108.

<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-719/>

Keywords: fractal, fractal analysis, fractal dimension, microstructure, structure formation, fractography of fracture surface, research methods, material diagnostics.

The article contains: used literature - 56, pages: - 81, pictures –29, 9 tables.

Зміст

| | |
|---|----|
| Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів..... | 14 |
| ВСТУП..... | 15 |
| РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВО-ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО ТРАДИЦІЙНОЇ ТА ФРАКТАЛЬНОЇ МЕТАЛОГРАФІЇ..... | 19 |
| 1.1 Фрактальне уявлення світу | 20 |
| 1.2 Розмірність..... | 29 |
| 1.3 Застосування фрактального аналізу до металографії..... | 31 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1 | 34 |
| РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ЗАДАЧ МЕТАЛОЗНАВСТВА..... | 35 |
| 2.1 Основні об'єкти дослідження та їх механічні властивості..... | 36 |
| 2.2 Відомості про методи дослідження..... | 37 |
| 2.3 Методика дослідження зразків на структурні характеристики..... | 40 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2 | 42 |
| РОЗДІЛ 3 ЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ВІДПОВІДНИХ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ..... | 43 |
| 3.1 Досліджувані механічні властивості..... | 43 |
| 3.2 Дослідження зразків на структурні характеристики | 48 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3 | 54 |
| РОЗДІЛ 4 НЕМЕТАЛІЧНІ ВКЛЮЧЕННЯ ТА ЇХ ВНЕСОК У ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ | 55 |
| 4.1 Досліджувані інокулятори | 55 |
| 4.2 Дослідження зразків на вміст неметалічних включень..... | 58 |
| 4.3 Дослідження зразків на розподіл неметалічних включень..... | 61 |
| ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4 | 63 |
| ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ | 64 |
| Список використаних джерел..... | 65 |
| ДОДАТОК 1 | 72 |
| ДОДАТОК 2 | 73 |
| ДОДАТОК 3 | 80 |
| ДОДАТОК 4 | 81 |

Перелік умовних позначень, символів, скорочень і термінів.

| | | |
|----------------------|---|------------------------------------|
| D | - | Фрактальна розмірність |
| KC | - | Ударна в'язкість |
| Ψ | - | Відносне звуження |
| δ | - | Відносне подовження |
| σ_γ | - | Границя пружності і пропорційності |
| σ_B | - | Границя міцності |

ВСТУП

Діагностика є вельми затребуваною наукою в усіх галузях, пов'язаних з життєдіяльністю людини. Люди завжди прагнули пізнати те, що приховано від людського ока. Технічна діагностика виникла не так давно, лише з приходом в життя людини техніки. Спочатку технічний стан об'єктів намагаються довести до ідеалу, витрачаючи неймовірні моральні і матеріальні засоби. Для визначення терміну служби об'єкта застосовуються різні методи технічної діагностики, з кожним роком все ретельніше удосконалюючи цю молоду науку.

Завданнями діагностики є, по-перше - вибір певного методу для вилучення інформації про матеріал, а по-друге - аналіз отриманих даних для прогнозування технічного стану та залишкового ресурсу.

Контроль, що дозволяє зберегти експлуатаційну придатність даного об'єкту без порушення його несучої здатності, що найбільш прийнятно при обстеженні об'єктів, що знаходяться в експлуатації, називається неруйнівним. Він побудований на непрямому визначенні властивостей і характеристик матеріалів. До характеристик матеріалу відносяться механічні властивості, які характеризують здатність матеріалів чинити опір дії зовнішніх сил. До основних механічних властивостей відносяться міцність, твердість, ударна в'язкість, пружність, пластичність, крихкість і ін.

Темою дисертації обрано «Розробка методів фрактального аналізу структури для оцінки властивостей конструкційних сталей». Через швид науково-технічний прогрес, а також через збільшення потреб суспільства діагностика потребує більш швидких та мобільних методів перевірки якості матеріалу. Фрактальний метод запропонував себе, як один із таких методів.

У твердому тілі фрактальні структури дефектів виникають при інтенсивному зовнішньому навантаженні, що спричиняє виникнення дефектів значної щільності. Спочатку розподіл дефектів є однорідним, потім

утворюються скупчення у вигляді клубків і пухких стінок осередків і, на завершення, формується чітко виражена чарункова(коміркова) структура.

Не проводячи високовартісних спеціальних випробувань, а лише використовуючи фрактальний підхід, виникає реальна можливість визначити і спрогнозувати експлуатаційні характеристики матеріалів, зокрема в діючих конструкціях. Таким чином робота є актуальною.

Мета і задачі дослідження. Метою науково-дослідної роботи є виявлення взаємозв'язків фрактальних розмірностей структурних параметрів D і фізико-механічних характеристик (ударної в'язкості, границь плинності та міцності) матеріалу із сталі 09Г2.

Для досягнення поставленої мети необхідно було вирішити такі завдання:

- 1 Здійснити теоретичний аналіз можливості використання фрактального методу для дослідження металевих конструкцій.
2. Виявити взаємозв'язки фрактальних розмірностей структурних параметрів D і фізико-механічних характеристик (ударної в'язкості, границь плинності та міцності) матеріалу із сталі 09Г2.
3. Дослідити зв'язок структурних параметрів із механічними характеристиками зразків із сталі 09Г2.
4. Здійснити теоретичний аналіз підходів (досліджень) до вивчення структур складових металу та охарактеризувати роль границь зерен та неметалевих включень, які впливають на механічні характеристики матеріалу.

Об'єкт дослідження – шліф із металу зварного з'єднання.

Предмет дослідження – виявлення взаємозв'язку механічних характеристик із структурними особливостями, зокрема з фрактальною розмірністю D .

Методи дослідження.

Короткочасні випробування циліндричних і плоских зразків на одновісний розтяг були виконані при кімнатній температурі на установці Instron 8802 згідно ГОСТ 1497-84. Швидкість переміщення рухомого захвату машини 10,0 мм/хв.

Металографічні дослідження мікроструктури шліфів здійснено на мікроскопі NEOPHOT-32зі застосуванням цифрової фотокамери OLYMPUS

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Вперше встановлено кореляційні залежності, які пов'язують фізико-механічні характеристики сталі 09Г2 із фрактальними розмірностями.

Показано, що існує залежність фрактальної розмірності із ударною в'язкістю, середнім розміром зерна та межами міцності та текучості.

2. Вперше для сталі 09Г2 встановлено кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю KCV при -40°C до 20°C , а також границями плинності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B .

Практичне значення одержаних результатів.

Отримані в роботі результати і встановлені зв'язки мають практичний інтерес для експрес прогнозування причин руйнування об'єктів із сталі..

Особистий внесок здобувача.

За матеріалами науково-дослідної роботи опубліковано 1 наукову роботу – доповідь у матеріалах міжнародної конференції. У співавторстві із викладачами та науковцями запропонований лабораторний практикум.

Апробація результатів роботи

1. Головка В. В., Штофель О.О., Короленко Д.Ю. (2022).

Пришвидчений метод обрахунку неметалічних включень на шліф
XI Міжнародна науково-практична конференція «Actual problems of learning and teaching methods», 06- 09 грудня 2022 р., Відень, Австрія
<https://isg-konf.com/uk/actual-problems-of-learning-and-teaching-methods/>

2. Штофель Ольга Олександрівна, Короленко Данило Юрійович, Головка Віктор Володимирович Вирішення питання тривалості обробки даних у задачах металознавства, Інформаційне суспільство: технологічні, економічні та технічні аспекти становлення (випуск 72): матеріали Міжнародної наукової інтернет-конференції, (м. Тернопіль, Україна – м. Переворськ, Польща, 15-16 листопада 2022 р.) / [редкол. : О. Патряк та ін.] ; ГО “Наукова спільнота”; WSSG w Przeworsku. – Тернопіль : ФО-П Шпак В.Б.
<https://ojs.ukrlogos.in.ua/index.php/mcnd/issue/view/03.12.2021/675>

3. Короленко Д. Ю., Науковий керівник: Штофель О. О. (2021). Фрактальний аналіз та його можливості у задачах металознавства. Наукові тренди постіндустріального суспільства: матеріали II Міжнародної наукової конференції (Т.2), м.Запоріжжя, 3 грудня, 2021р. / Міжнародний центр наукових досліджень. —Вінниця: Європейська наукова платформа, 2021. —136с. ISBN 978-617-8037-16-1 ISBN 978-617-8037-18-5 (ТОМ 2) DOI10.36074/mcnd-03.12.2021, 2021, 106-108.
<http://www.konferenciaonline.org.ua/ua/article/id-719/>

Ключові слова: фрактал, фрактальний аналіз, фрактальна розмірність, мікроструктура, структуроутворення, фрактографія поверхні руйнування, методи дослідження, діагностика матеріалу.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ НАУКОВО-ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ ЩОДО ТРАДИЦІЙНОЇ ТА ФРАКТАЛЬНОЇ МЕТАЛОГРАФІЇ

Метод фрактального аналізу можна віднести до одного із сучасних та перспективних напрямів моделювання складних систем, до яких відноситься і структура металу. Сьогодні теорія фракталів та мультифракталів активно використовується для опису властивостей самоподібності і масштабної інваріантності, що спостерігаються в різних фізичних ситуаціях.

Найрізноманітніші природні об'єкти можна віднести до спеціального класу «мультифракталів», досить складно знайти область науки, у якій відсутні представники цього класу.

До фракталів відносять геометричні об'єкти (лінії, поверхні, просторові тіла), які мають сильно порізану форму і демонструють деяку повторюваність у широкому діапазоні масштабів. Повторюваність може бути повною - у цьому випадку говорять про регулярні фрактали, або може спостерігатися певний елемент випадковості - такі фрактали називають випадковими. Структура випадкових фракталів на малих масштабах не є ідентичною всьому об'єкту, але їх статистичні характеристики збігаються.

Для кількісного опису фракталів достатньо однієї величини - фрактальної розмірності або параметра, що описує збереження статистичних характеристик зміни масштабу.

Проблема оцінки структури та якісних характеристик металів вирішується протягом значного періоду часу методами та засобами фізики твердого тіла, механіки, хімії, матеріалознавства та інших наукових дисциплін.

Причина цього полягає в тому, що сам по собі аналіз структури та оцінка якісних характеристик металів є трудомістким процесом і потребує комплексного підходу, полягає у поєднанні традиційних методів оцінки якісних характеристик металів із новими методами оцінки їх структури.

Аналіз традиційних методів електронної та оптичної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, кількісної металографії свідчить, що жоден з них не може бути універсальним та придатним для вирішення повного обсягу завдань ідентифікації якісних характеристик металу шляхом аналізу його структури.

1.1 Фрактальне уявлення світу

Фрактал (лат. *Fractus* – *дроблений*) - в прямому значенні, це той хто подрібнений, фрагментований, а за визначенням це фігури, що мають властивість самоподібності, або масштабної інваріантності. Започаткування фрактальної геометрії пов'язано із виходом в 1977 році книги Бенуа Мандельброта «*Fractals: Form, chance, and dimension*». Фрактальна геометрія дозволяє чисельно описувати неперекладні об'єкти за допомогою фрактальної (дробової) розмірності. При деформації матеріалів на їх поверхні з'являється деформований рельєф, який може характеризуватись фрактальною розмірністю, а вже її на самперед використовують при огляді структур металів, поверхонь зламів, зон руйнування і структурних меж в'язко-крихкого переходу.

В основному фрактали ділять на геометричні, алгебраїчні та стохастичні (рис. 1.1). За певних умов стохастичні фрактали можуть називатися мультифракталами.

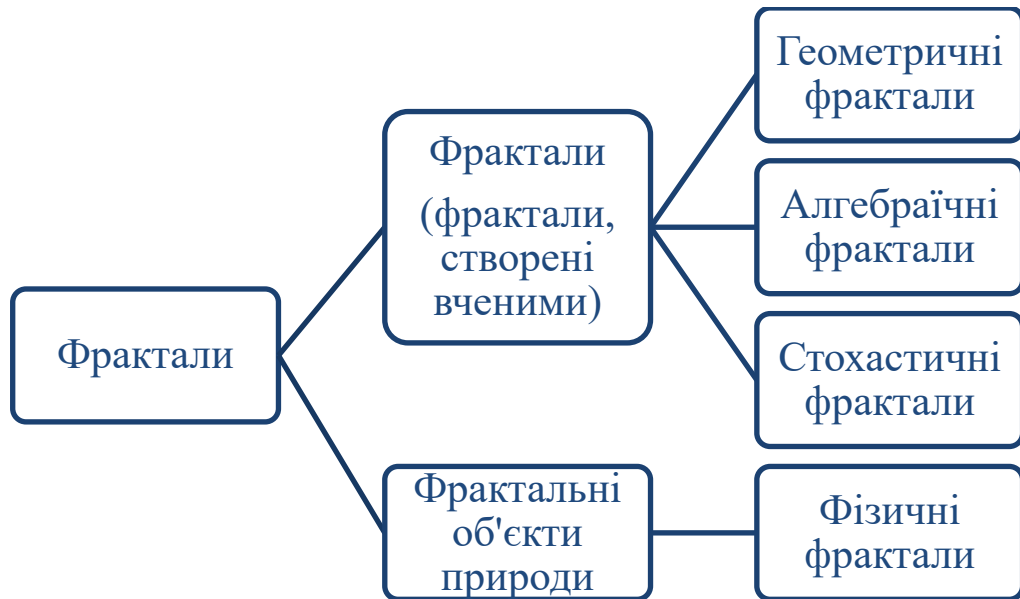


Рисунок 1.1 - Класифікація фракталів

Проте є й інші класифікації: рукотворні та природні. До рукотворних відносяться ті фрактали, які були придумані вченими, вони за будь-якого масштабу мають фрактальні властивості. На природні фрактали накладається обмеження на область існування - тобто максимальний і мінімальний розмір, за яких об'єкт зберігає фрактальні властивості.

Геометричні фрактали. Історія фракталів почалася з геометричних фракталів, які досліджувалися математиками у XIX столітті. Фрактали цього класу — найнаочніші, бо в них одразу видно самоподібність. Програмно такі фрактали можна отримати, задавши деяку функцію, яка називається генератором. За один крок алгоритму кожна із відрізків/областей, що становлять функцію, замінюється на функцію-генератор, у відповідному масштабі. Внаслідок нескінченного повторення цієї процедури виходить фрактальний об'єкт. При видимій складності отриманого об'єкту, його загальний вигляд задається лише формою генератора.

Прикладами геометричних фракталів є (рис.1.2-1.11):

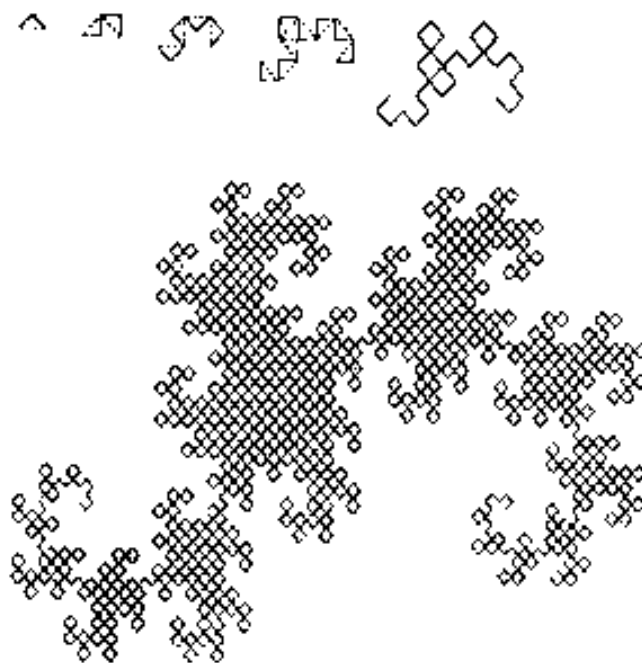


Рисунок 1.2 - Крива дракона

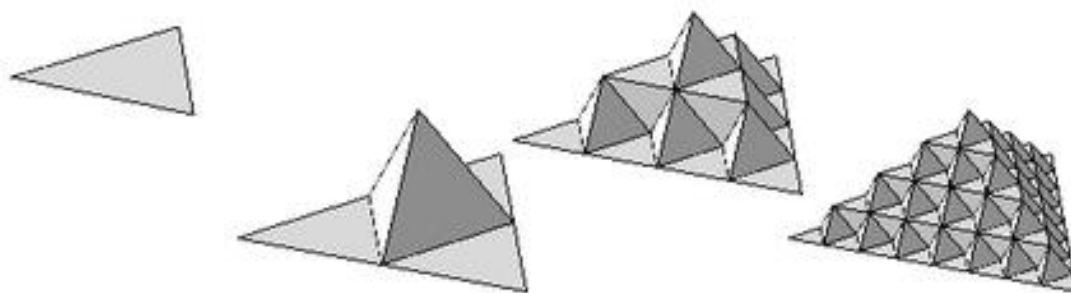


Рисунок 1.3 - Крива Коха

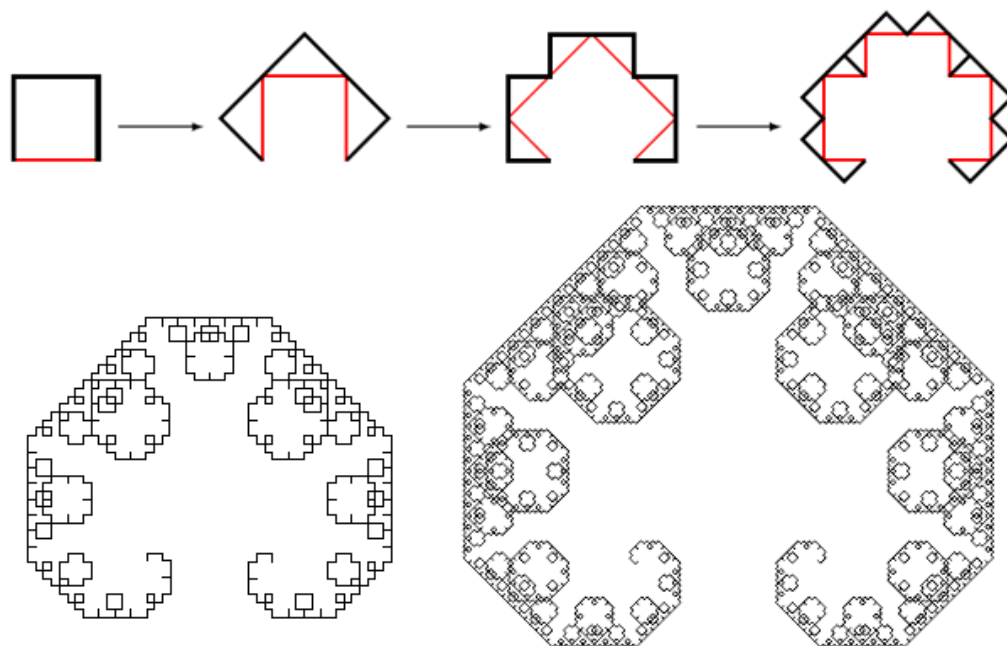


Рисунок1.4 - Крива Леві

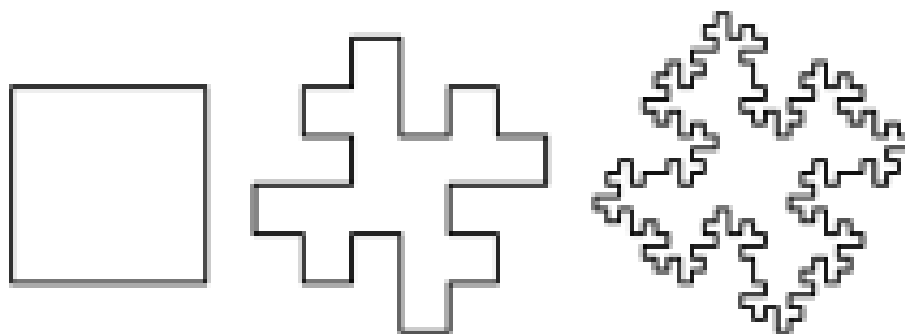


Рисунок1.5 - Крива Мінковського

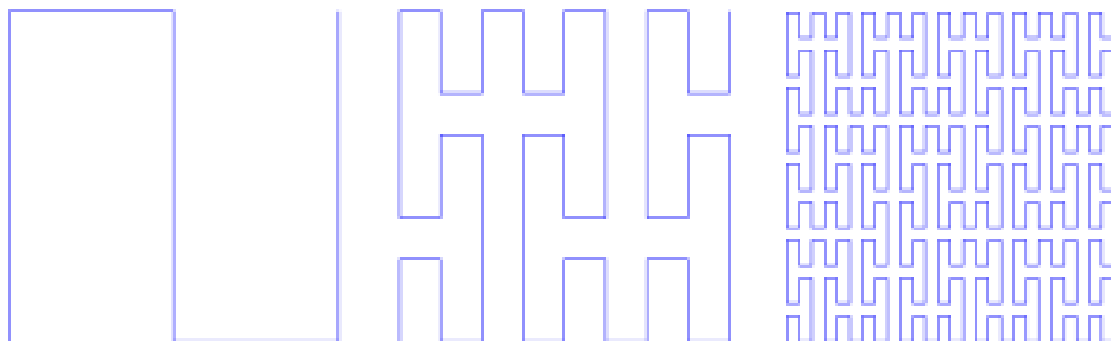


Рисунок1.6 - Крива Пеано

До геометричних фракталів також відносять фрактали, одержувані схожими процедурами, наприклад:



Рисунок1.7 - Множина Кантора

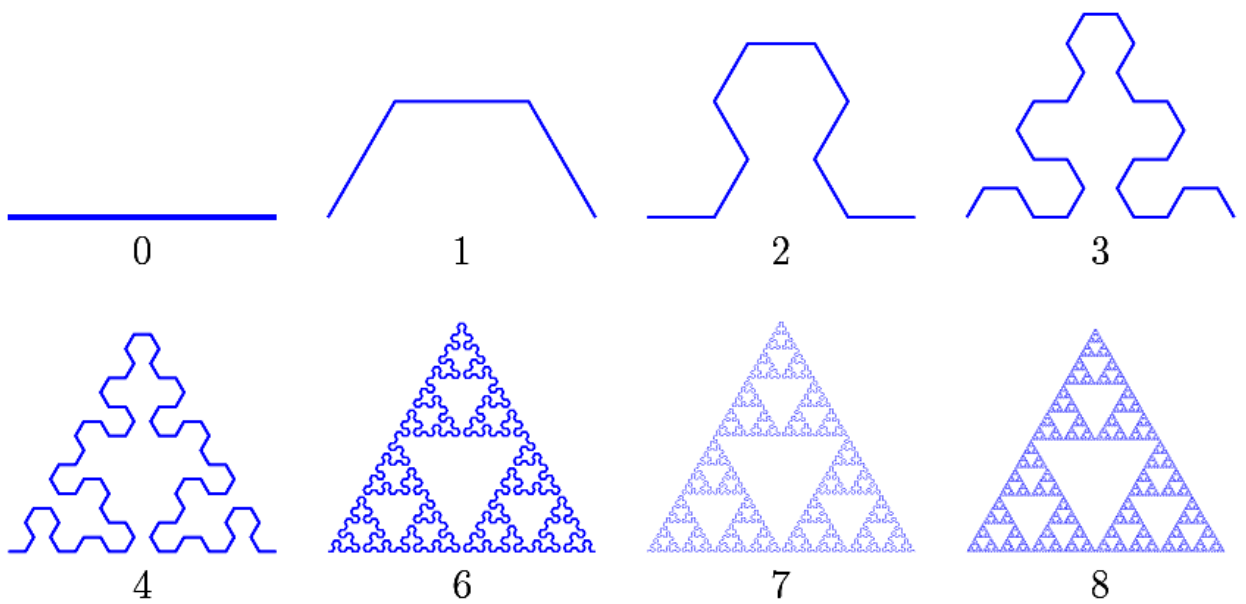


Рисунок1.8 - Трикутник Серпінського

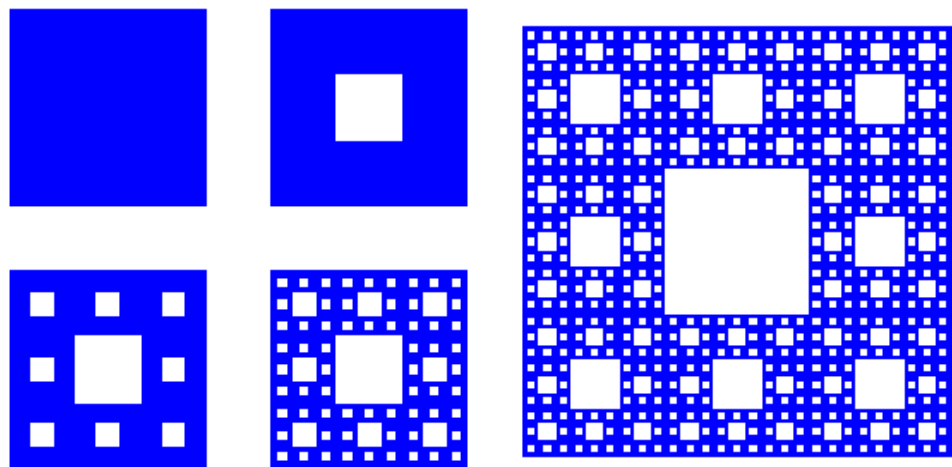


Рисунок1.9 - Килимок Серпінського

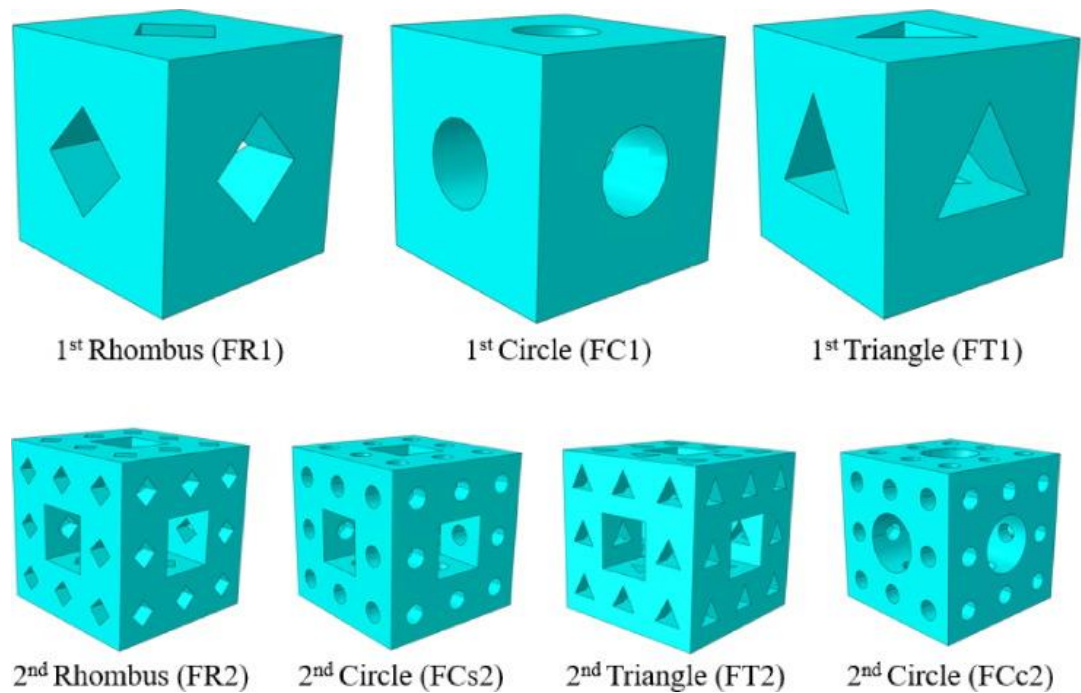


Рисунок1.10 - Губка Менгера

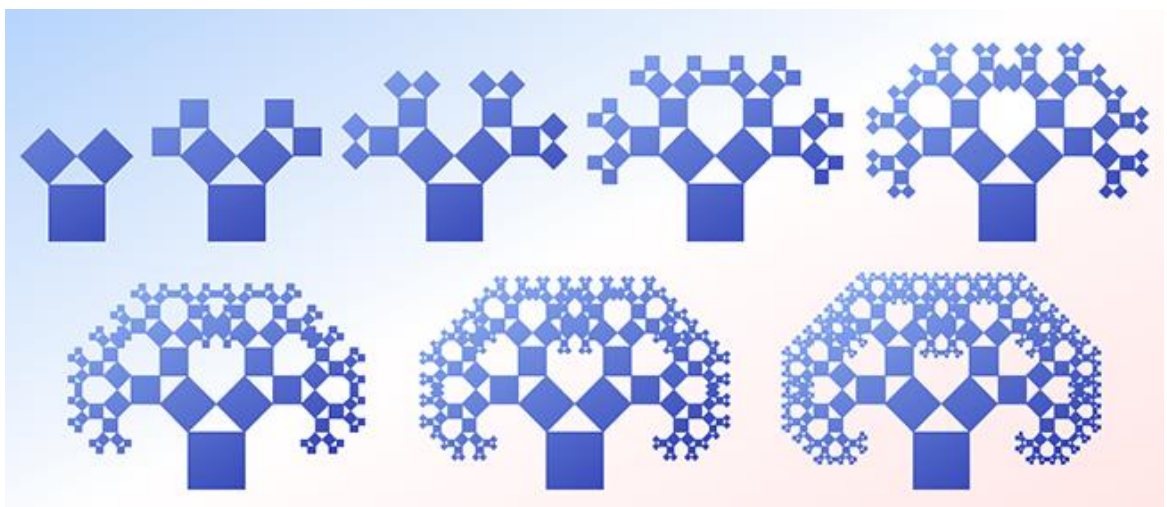


Рисунок1.11 -Дерево Піфагора

Алгебраїчні фрактали. Для побудови алгебраїчних фракталів використовуються ітерації нелінійних відображень, що задаються простими алгебраїчними формулами. Найбільш вивчений двовимірний випадок. Нелінійні динамічні системи можуть мати кілька стійких станів - атракторів. Кожен атрактор має деяку область початкових станів, при яких система обов'язково в нього перейде. Таким чином, фазовий простір розбивається на

ділянки, у які може перейти атрактор. Якщо фазовим є двомірний простір, то, забарвлюючи області, у які переходить атрактор, різними кольорами, можна отримати фазовий колірний портрет цієї системи (ітераційного процесу). Змінюючи алгоритм вибору кольору, можна отримати складні фрактальні картини із різними кольоровими візерунками. Несподіванкою для математиків стала можливість за допомогою примітивних алгоритмів породжувати складні нетривіальні структури.

Алгоритм побудови досить простий і ґрунтується на ітеративній функції:

$$x_i + 1 = F(x_i) \quad (1.1)$$

де $F(x_i)$ - будь-яка функція комплексної змінної.

Для всіх точок прямокутної або квадратної області на комплексній площині обчислюємо досить велику кількість разів функції (1), щоразу знаходячи абсолютне значення x . При цьому значення функції для різних точок комплексної площини можуть мати різну поведінку:

- $|x| \rightarrow \infty$;
- $|x| \rightarrow 0$;
- $|x|$ приймає кілька фіксованих значень і не виходить за межі;
- Поведінка $|x|$ хаотична, без будь-яких тенденцій.

Одним із найпоширеніших способів розфарбовування точок буде порівняння $|x|$ із заздалегідь обраним числом, яке вважається «нескінченним», тобто колір точки дорівнює номеру ітерації, на якій $|x|$ досягає «нескінченності».

Також можна змінити вигляд фракталу, якщо контроль значення x вести іншим чином, наприклад:

- Дійсна частина x менша за певне число;
- Уявна частина x менша за певне число;
- І уявна і дійсна частини x менша від будь-якого числа;

- Інші методи.

І, нарешті, ще один цікавий ефект – зміна палітри. Після того, як зображення побудоване, можна циклічно змінювати кольори зафарбованих областей, і тоді і без того дивовижне зображення оживе на екрані.

Приклади фракцій алгебри (рис.1.12-1.15):

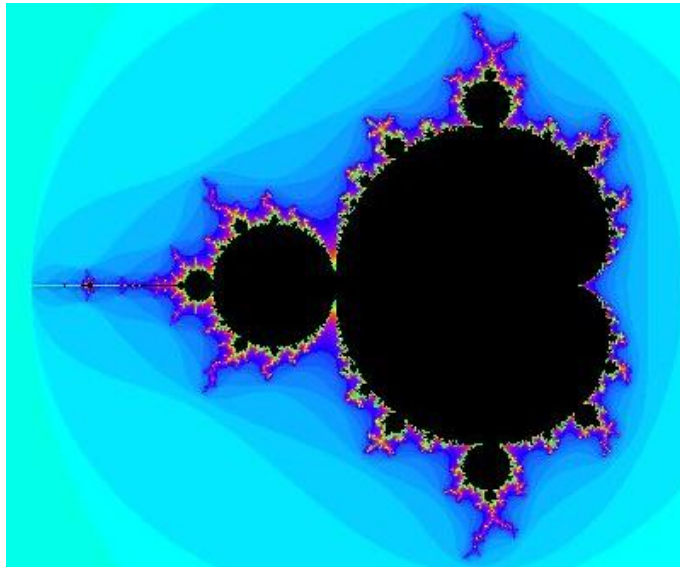


Рисунок1.12 - Множина Мандельброта

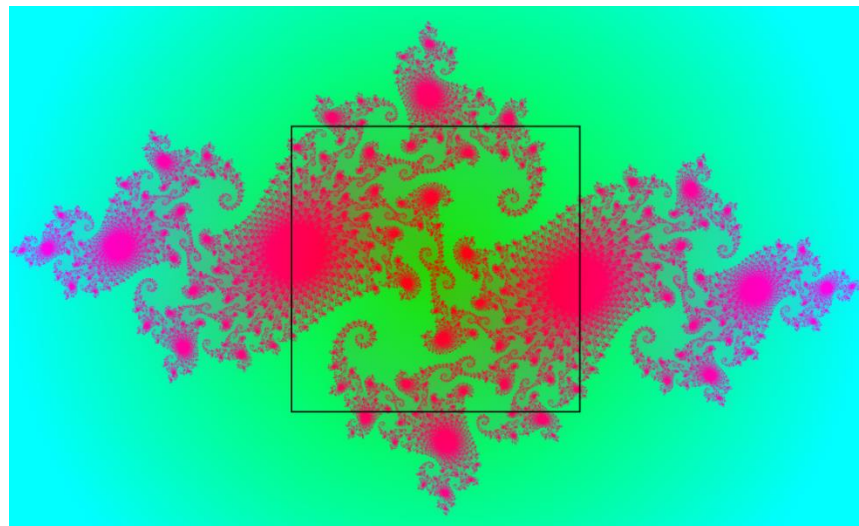


Рисунок1.13 - Множина Жюліа

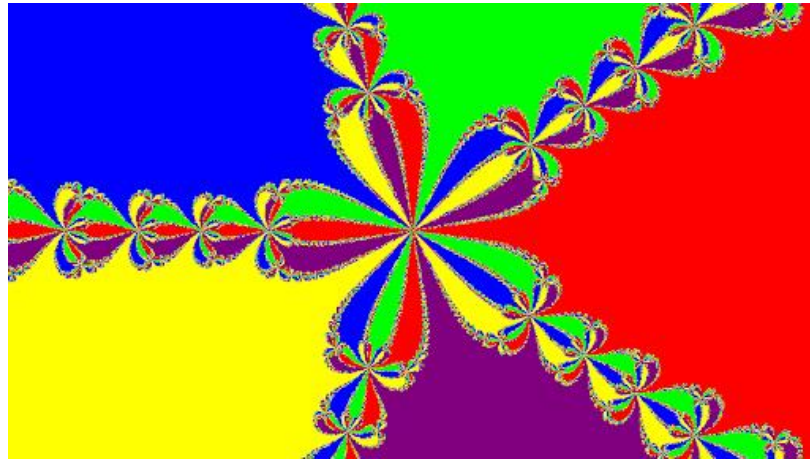


Рисунок1.14 - Басейни Ньютона

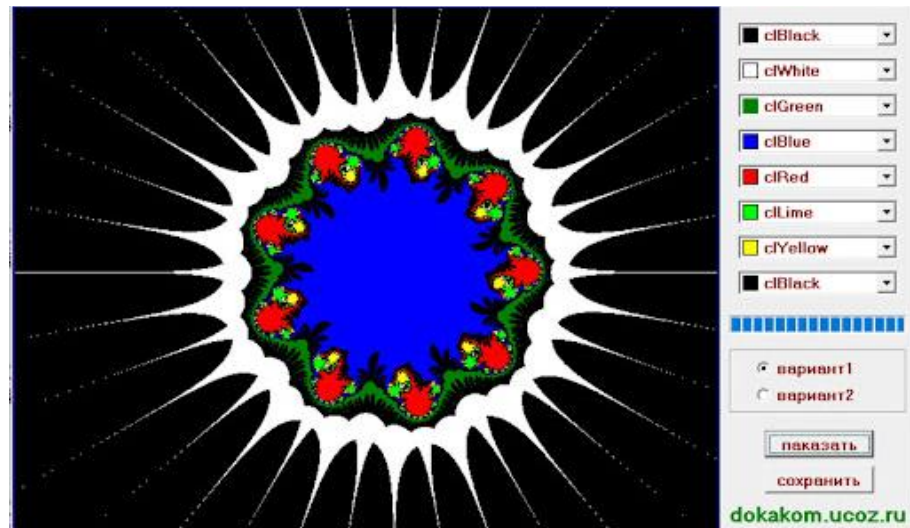


Рисунок1.15 - Фрактал біоморфи.

Стохастичні фрактали. Усі природні об'єкти створюються за примхою природи, у процесі завжди є випадковість. Фрактали, при побудові яких у ітеративної системі випадково змінюються будь-які параметри, називаються стохастичними (рис.1.16). Ці фрактали найцікавіші для фізиків, оскільки знаходять своє відображення у фізичних процесах. Співвідношення випадковості та закономірності може бути різним.



Рисунок 1.16 - Приклади стохастичних фрактальних об'єктів

1.2 Розмірність

Існують різні розмірності для множин. Звичні зі шкільної лави уявлення про тривимірний простір, двомірну площину, одновірну лінію і т.д. мають досить поверхневий і спрощений погляд на все різноманіття, яке приховує в собі термін розмірність. Найчастіше концепції розмірності будуються через виявлення параметрів, що відносяться до множин, що покривають.

Розмірність сильно залежить від того, як її вимірювати. Це означає, що крім формул для підрахунку розмірності необхідно точно задати якийсь операційний набір способу вимірювання та інтерпретації розмірності. Традиційно з розмірністю пов'язують кількість незалежних параметрів, необхідних, щоб задати положення точки у просторі. Положення точки області площини, обмеженої квадратом можна задати двома вимірами, і тоді її

розмірність дорівнюватиме двом. А можна уявити цю область у вигляді ламаної з дуже сильно притиснутими один до одного ланками, складеними на зразок столярного метра, наприклад, кривою Пеано. Тоді, для завдання положення точки вистачить і одного виміру, і розмірність дорівнюватиме одиниці.

Розмірність Мінковського. Нехай множина $A \in R^n$. Для цього апроксимуємо A об'єднанням куль (рис.1.17) та підсумуємо їх об'єми, або обрані міри вимірювання.



Рисунок 1.17 -Об'єднання куль на кривій

Нехай $N(\varepsilon)$ — мінімальна кількість куль радіусу ε , необхідних для покриття компактної множини A . Їх сумарний об'єм V пропорційний $N(\varepsilon)\varepsilon^D$. При $\varepsilon \rightarrow 0$, $N(\varepsilon) \rightarrow \text{const}/\varepsilon^D$. Логарифмуємо та отримуємо $\ln N(\varepsilon) \rightarrow \ln \text{const} - D \cdot \ln \varepsilon$.

Знаходимо

$$\frac{\ln N(\varepsilon) \rightarrow \ln \text{const} - \ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \rightarrow D \quad (1.2)$$

При $\varepsilon \rightarrow 0$ значення $\ln \text{const}$ дуже мале порівняно з $\ln N(\varepsilon)$, отже розмірність Мінковського визначається за формулою (3).

$$\dim_M(A) = D = - \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\varepsilon)}{\ln \varepsilon} \quad (1.3)$$

При розрахунку фрактальної розмірності за Мінковським можна за міру покриття обирати і куби.

Розмірність Хаусдорфа-Безиковіча. Ця розмірність має схожість із розмірністю Мінковського. Різниця в тому, що кулі беруться довільного радіусу $0 < r \leq \varepsilon$ і множина не обов'язково компактна.

Нехай A є довільною множиною $A \in R^n$. Розглянемо послідовність куль $r_i < \varepsilon, i = 1, 2, 3 \dots \infty$, які покривають A .

Використовуючи узагальнену формулу об'єму кулі запишемо

$$S_{d,\varepsilon}(A) = \inf \sum_{i=1}^{\infty} \gamma(d) r_i^d \quad (1.4)$$

Фелікс Хаусдорф зміг довести, що існує єдине дійсне число d , для якого $S \neq 0$ і $S \neq \infty$ при $\varepsilon \rightarrow 0$. Свій внесок у доказ теореми зробив Абрам Безикович, тому розмірність d називається розмірність Хаусдорфа-Безиковіча.

На початку ця величина не викликала великого інтересу вчених. Але надалі вона зіграла важливу роль у математиці фракталів. У математичній літературі вона позначається як $dim_H(A)$.

1.3 Застосування фрактального аналізу до металографії

Металографічні дослідження- це комплекс випробувань і аналітичних заходів, спрямований на вивчення макроструктури і мікроструктури металів, дослідження закономірності утворення структур і залежність впливу структури на механічні, фізико-механічні, електричні та інші властивості металу.

Загальною задачею металографічного аналізу є дослідження структури та дефектів, зокрема таких як включення, основного металу та наплавленого

металу зварного з'єднання. Металографічний аналіз включає дослідження макро- та мікроструктури металів. Останнім часом цей перелік було доповнено методом фрактального аналізу [1]. Унизки робіт авторами описана причина використання та застосування методу фрактального аналізу, базуючись на відомих в різних наукових сферах поняттях фракталів [2]. Основною метою використання фракталу у сфері металознавства є встановлення зв'язку в системі «структура –фрактальна розмірність – властивості». Із використанням описаних вище підходів, у роботі [3] було описано один із етапів пошуку зв'язків між результатами фрактального аналізу з даними еталонної шкали структурних складових в металі зварних швів низьколегованої сталі.

Характеристики фракталу, які свідчать про те, що фрактальний аналіз можна застосовувати до оцінки структури та властивостей металів:

1. Мікроструктура металу є фракталом, тому що у множини є деталі необмежено маленького розміру, множина занадто нерегулярна, щоб описуватися звичайною геометрією і вона (множина) самоподібна.

2. Можливо встановити взаємозв'язок між фрактальною розмірністю, ступенем фрактальності та властивостями металу.

Ці твердження доводяться у дисертаційній роботі Штофель Ольги Олександрівни Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку структури і властивостей конструкційних сталей, Київ, 2021.

Основа фрактального підходу полягає у обробці масштабування, або «скейлінга», як писав у себе Єнс Федер у труді «Фрактали», фрактальної структури та описі розподілу будь-якої структурної характеристики або міри при цьому масштабуванні. Це математичний алгоритм виявлення єдиного числового елементу для опису багаторівневих структур, якими є, зокрема, структури металів, поверхні зламів, зони руйнування, структурні кордони

в'язко-крихкого переходу, тощо. Тому в наш час, метод фрактального аналізу - це один з найперспективніших напрямків цифрової обробки зображень. Цьому сильно сприяє факт того, що багато природних об'єктів в якійсь степені можна вважати звичайними, або мультифракталами, так як їх часткова самоподібність пов'язана з відсутністю у їх фрактальної характеристики залежності від масштабу. Саме тому кордони формування фрактальної поведінки є важливою складовою процесу, в якому складається фрактальна характеристика.

Розгорнутий аналіз щодо управління структуроутворенням з позиції теорії фракталів при технологічних процесах - різних видах термообробки, легуванні, надшвидкому загартуванні тощо проведено у роботах Федера Є., Кроновера Р.М., Іванової В.С.. При деформації матеріалів на їх поверхні з'являється рельєф, який може характеризуватись фрактальною і якраз за допомогою цих фрактальних характеристик, описують такі параметри металів як: структуру матеріалу, рівень жорсткості і хімічних змін поверхонь, рівень деформації, а детально це все описано в роботі; Д.Г. Привезенцева, А.Л. Жизнякова: «Огляд фрактальних методів цифрової обробки зображень в металографії» [4].

Причина розгляду фрактального підходу полягає в тому, що фрактали можна використовувати як ідеальні зразки-моделі реальних об'єктів і процесів, що дозволяє створити більш легку розрахункову програму, яка дозволить спростити підрахунок квадратів для різного масштабу і отримає набір унікальної інформації про стан, структуру, властивості. та спрогнозувати подальшу поведінку спостережуваної величини.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Проведено аналіз щодо типів фрактальних об'єктів та можливості використання фрактального методу, для оцінки фізичних і механічних характеристик металу.

2. Постулюється, що фрактальний метод є один з перспективних способів для вивчення структури металів та їх фізико-механічних характеристик.

3. Побудовано траєкторію можливих досліджень, так як на даний момент метод не набув широкого застосування, а отже є велика кількість сталей, на яких не апробовано застосування фрактального методу.

РОЗДІЛ 2 ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ЗАДАЧ МЕТАЛОЗНАВСТВА

Метали – це непрозорі речовини та їхню будову вивчають у зламі або спеціально приготовлених зразках (макрошліфах). Зразок вирізають з певного місця, у певній площині залежно від того, що піддають дослідженню (лиття, поковку, штампування, прокат, зварену або термічно оброблену деталь) і що необхідно виявити та вивчити (первинну кристалізацію, неоднорідність структури, дефекти тощо). Тому зразки вирізають з одного або декількох місць зливка (або заготовки, або деталі) як в поздовжньому, так і в поперечному напрямках. Поверхню зразка (темплету) вирівнюють на наждачному колі, а потім шліфують. Після шліфування темплет труять у спеціальних реактивах, які по-різному розчиняють структурні складові та розбещують дефекти.

Металографічними дослідженнями називається комплекс випробувань та аналітичних заходів, спрямований на вивчення макро- та мікроструктури металів, дослідження закономірності утворення структури та залежностей впливу структури на властивості металу. В свою чергу мета даної роботи полягає у пошуку взаємозв'язків між даними отриманими для структур, за допомогою металографічного дослідження та методом фрактального аналізу.

Металографічні дослідження зразків вимагають достатньої уваги при виборі зразків, підготовці – шліфуванні, поліруванні, травленні, а також при вивченні структури [5]. Для дослідження структури металів та її впливу на їх властивості широко використовуються традиційні методи макро та мікроаналізу [6]. Також, поруч із традиційними методами представлений метод фрактального аналізу, який дозволяє оцінити мікро-, макрофотографію структури із запровадженням величини фрактальної розмірності. Фрактальна розмірність була введена Мандельбротом і застосована до вивчення поверхні руйнування металу [7]. Метод фрактального аналізу успішно

використовувався при дослідженні процесів тріщиноутворення в металах та сплавах [8].

Методи фрактальної геометрії виявилися ефективними при аналізі явищ самоорганізації у дисипативних системах та дозволили пов'язати зміни фрактальної розмірності з властивостями металу [9].

2.1 Основні об'єкти дослідження та їх механічні властивості

У цій роботі проводиться вивчення металографічної картини структури зразків та її фрактальної розмірності. Зразки були вирізані із основного металу зварних з'єднань. Усі зразки виготовляли за стандартною методикою із застосуванням алмазних паст різної дисперсності. Металографічні дослідження проводили на мікроскопі Neophot-32 при різних збільшеннях. Для виявлення мікроструктури проводилося хімічне травлення у 4% розчині азотної кислоти у спирті.

У роботі описані проведені дослідження щодо виявлення взаємозв'язку механічних характеристик із структурними особливостями, зокрема з фрактальною розмірністю D для структури металу зварного з'єднання сталі 09Г2 і її механічні характеристики в металургії, металознавстві, матеріалознавстві при використанні методу фрактального аналізу. Сталь конструкційна низьколегована для зварних конструкцій, марка сталі 09Г2 широко застосовується при виробництві труб та іншого металопрокату. Також марка широко використовується для зварювальних конструкцій і стійки ферм, верхні обв'язки вагонів, хребтові балки та інші деталі вагонобудування, деталі екскаваторів, елементи зварних металоконструкцій та інші деталі, що працюють за температури від -40 до $+450$ С. Ще прокат такої сталі застосовується при виробництві будівельних конструкцій різних форм і

розмірів. При цьому, завдяки високій механічній міцності уможлиблюється створення більш тонких деталей, ніж з інших сталей. Зварювання може проводитися як без підігріву, так і з попереднім підігрівом до 100-120 С. Так як вуглецю в сталі мало, то зварювання її досить просте, причому сталь не загартовується і не перегрівається в процесі зварювання, завдяки чому не відбувається зниження пластичних властивостей або збільшення її зернистості. До переваг застосування цієї сталі можна віднести також, що вона не схильна до відпускнуї крихкості і її в'язкість не знижується після відпуски. Наведеними вище властивостями пояснюється зручність використання 09Г2 від інших сталей з великим вмістом вуглецю або присадок, які гірше варяться і змінюють властивості після термообробки.

Головна причина затребуваності марки сталі полягає у підвищеній надійності виробів і будівельних металоконструкцій, виконаних з неї. Даний сплав забезпечує найкраще поєднання міцності та простоти обробки, а широкий температурний діапазон дозволяє використовувати вироби з нього на нафтових та газових розробках, розташованих у регіонах із суворим кліматом.

2.2Відомості про методи дослідження

Якість продукції це сукупність властивостей продукції, що зумовлюють її придатність задовольняти певні потреби відповідно до її призначення. Якість зварних виробів залежить від відповідності матеріалу технічним умовам, стану обладнання та оснащення, правильності та рівня відпрацювання технологічної документації, дотримання технологічної дисципліни, а також кваліфікації працюючих. Забезпечити високі технічні та експлуатаційні властивості виробів можна лише за умови точного виконання технологічних процесів та їхньої стабільності. Особливу роль тут грають різні методи

об'єктивного контролю як виробничих процесів, і готових виробів. При правильній організації технологічного процесу контроль має бути його невід'ємною частиною. Виявлення дефектів служить сигналом не тільки до відбракування продукції, але і оперативного коригування технології. Зварювальні конструкції контролюють на всіх етапах їх виготовлення.

Найбільш відповідальним моментом є поточний контроль за виконанням зварювання. Організація контролю зварювальних робіт може проводитись у двох напрямках: контролюють самі процеси зварювання або отримані вироби. Контроль процесів дозволяє запобігти появі систематичних дефектів і особливо ефективний при автоматизованому зварюванні (автоматична та механізована дугова, електрошлакова та ін.).

Контроль за зразками технологічних спроб. У цьому випадку періодично виготовляють зразки сполук з матеріалу тієї ж марки і товщини, що і виріб, що зварюється, і піддають їх всебічній перевірці: зовнішньому огляду, випробуванням на міцність з'єднань, просвічування рентгенівськими променями, металографічному дослідженню і т.д. До недоліків такого способу контролю слід віднести деяку різницю між зразком і виробом, а також можливість зміни зварювальних умов з виготовлення одного зразка до моменту виготовлення наступного.

Прийнято розрізняти структуру металів (рис.2.1) та сплавів на: макроструктуру, мікроструктуру та тонку структуру. Залежно від структури металів та сплавів, виділяють три методи їх дослідження:

- Макроскопічний аналіз
- Мікроскопічний аналіз
- Рентгеноструктурний аналіз та рентгенівська дефектоскопія

Макроскопічний аналіз. Макроструктура - це будова металів та сплавів, що видно неозброєним оком або при невеликих збільшеннях за допомогою лупи (макс. до 30-40 разів). Макроструктура вивчається шляхом макроаналізу.

Макроаналіз виявляє:

- вид зламу (крихкий, в'язкий);
- величину, форму та розташування зерен та дендритів литого металу;
- дефекти в зливках та виливках (усадкові раковини, газові бульбашки, тріщини);
- дефекти, що порушують суцільність металу (садинну пористість, газові бульбашки, раковини, тріщини);
- хімічну неоднорідність металу, викликану процесами кристалізації або створену термічною та хіміко-термічною обробкою;
- розташування волокон у кованих та штампованих заготовках;
- тріщини, що виникають під час обробки тиском або термічної обробки, дефекти в зварних швах.

Мікроскопічний аналіз. Більш тонким методом дослідження структури та вад металів є мікроаналіз, тобто вивчення структури металів при великих збільшеннях за допомогою металографічного мікроскопа.

Мікроскопічний аналіз – вивчення поверхні з допомогою світлових мікроскопів, де збільшення межах 50...2000 раз дозволяє виявити елементи структури розміром до 0,2 мкм.

Мікроаналіз дозволяє виявити:

- величину, форму та розташування зерен;
- окремі структурні складові сплаву, виходячи з яких можна визначити хімічний склад відпалених вуглецевих сталей;
- якість теплової обробки (наприклад, глибину проникнення загартування);

- різні дефекти (перепалювання, наявність неметалевих включень).



Рисунок 2.1 - Методи дослідження будови (структури) металу

2.3 Методика дослідження зразків на структурні характеристики

Звичайне геометричне уявлення про структуру дає можливість дослідити певні характеристики зерен, такі як - середній розмір зерна, кількість зерен на одиницю площі, середню площу зерна, поперечний розмір зерна, а також протяжність границь зерен. Нажаль, геометричне уявлення досить наближена характеристика, для більш ретельного дослідження структури використовують статистичні аналізи - розбити зерна однакових характеристики на групи і порівняти із стандартними таблицями, також кількісні характеристики структури шліфа дозволяють, за допомогою спеціальних методів, перейти до опису просторової структури сплавів.

Фрактальна геометрія описує структуру більш ретельно, але за умовою, що дана структура є фрактальною. Зроблені висновки що натурні фрагменти та зразки для механічних іспитів підпорядковуються фрактальній природі, адже мікроструктура є фракталом так як у структурі є деталі необмежено

маленького розміру, структура занадто нерегулярна, щоб описуватися звичайною геометрією і структура самоподібна. Отже, можливо встановити взаємозв'язок між фрактальною розмірністю, ступенем фрактальності, властивостями матеріалу і спрогнозувати поведінку та характер механічних властивостей за допомогою фрактальних множин.

Визначено, що в металографії фрактальний аналіз стосується мікроскопічних зображень поверхонь матеріалів. При цьому за допомогою мультифрактальних характеристик можна описати структуру і механічні властивості матеріалів. Наприклад, за допомогою фрактальних характеристик можна описати такі параметри матеріалів як характер структури матеріалу, ступінь шорсткості поверхоні, хімічні зміни поверхні, деформацію матеріалів та ін.

Структурна неоднорідність полікристала обумовлена різною орієнтацією зерен до напрямку діючого навантаження і їх різними характеристиками міцності властивостями, що залежать від розподілу легуючих елементів і домішок. У ряді випадків може спостерігатися структурна неоднорідність у вигляді макроділянок значних розмірів з підвищеним і зниженим вмістом легуючих елементів. Ці ділянки по-різному чинять опір малоцикловій деформації і руйнуванню внаслідок їх різних вихідних характеристик міцності властивостей.

Методика дослідження зразків на структурні характеристики перш за все полягає у обробці вихідного зображення та визначення досліджуваного параметра - розмір зерна, фрактальна розмірність зерен або границь зерен.

Після обробки зображення – прибирання «шумів», виділення досліджуваних елементів (рис.2.2), переведення у контрастний вигляд, зображення покривається, за методом Мінковського, квадратами фіксованого розміру і підраховується кількість об'єктів, що потрапили у них. За формулою

Мінковського обраховується значення фрактальної розмірності для шуканої характеристики:

$$D = \frac{\log N(\varepsilon)}{\log \frac{1}{\varepsilon}} \quad (2.1)$$

де $N(\varepsilon)$ - кількість об'єктів, що потрапили у квадрати, ε - лінійний розмір квадрата, що покриває множину (мікрошліф).



Рисунок 2.2 - Етапи обробки зображення, для роботи із структурною характеристикою – границя зерна

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. Описані основні задачі металознавства та можливість отримання даних із структури металу при різному збільшенні;
2. Проаналізовані напрямки дослідження та описано метод фрактального аналізу, який буде застосований до них.

РОЗДІЛ 3 ЗВ'ЯЗОК СТРУКТУРНИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ВІДПОВІДНИХ МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Механічні властивості матеріалів визначають на спеціальних зразках. Залежно від умов застосування навантаження розрізняють статичні та динамічні випробування. При статичних випробуваннях навантаження додається повільно та плавно зростає. При динамічних випробуваннях її застосування йде з високою швидкістю.

Випробування можуть виконуватись за нормальної (кімнатної) або зміненої температури.

3.1 Досліджувані механічні властивості

Найчастіше визначеними механічними характеристиками матеріалів є: твердість, межі міцності та текучості, ударна в'язкість. Визначають також межі витривалості та повзучості. Межу міцності встановлюють у процесі випробувань на розтяг, стиснення, кручення та вигин.

Межу міцності, межу плинності, відносне подовження та звуження визначають при випробуваннях на розтяг спеціальних зразків, які виконують на розривних машинах (рис. 3.1). Зразки поміщають у затискачі розривної машини, потім розтягують до руйнування.

У процесі застосування навантаження у зразку виникає напруга σ , МПа, що дорівнює відношенню прикладеного зусилля R до площі зразка F :

$$\sigma = \frac{R}{F} \quad (3.1)$$

Під впливом прикладеного навантаження виникає деформація — зміна розмірів зразка. Деформація може бути пружною чи пластичною.

Пружна деформація повністю зникає після зняття навантаження і не призводить до помітних змін у структурі та властивостях матеріалу. Розрізняють абсолютну та відносну деформацію.

Абсолютна деформація Δl – зміна розміру (довжини при випробуваннях на розтяг), відносна ε – відношення абсолютної деформації до початкової довжини l_0 , тобто $\Delta l/l_0$.

Між напругою та відносною пружною деформацією існує лінійна залежність - закон Гука:

$$\sigma = \varepsilon E \quad (3.2)$$

де E - модуль пружності, властивість матеріалу, що характеризує його жорсткість, тобто. здатність чинити опір пружним деформаціям.

Основними параметрами цих характеристик є: σ_B – (границя міцності або тимчасовий опір руйнуванню в МПа) це умовне механічне напруження, що відповідає найбільшому зусиллю, що досягається в процесі деформування зразка матеріалу, досягнутому до поділу зразка на частини, котре відповідає максимуму на діаграмі деформування. До настання цього моменту досягнення границі міцності подовження матеріалу розподіляється рівномірно по всій довжині зразка і площа поперечного перерізу зразка змінюється неістотно та рівномірно по всій довжині. Знаючи цю характеристику, ми можемо з точністю прогнозувати, яке механічне навантаження зруйнує тіло з вибраного матеріалу.

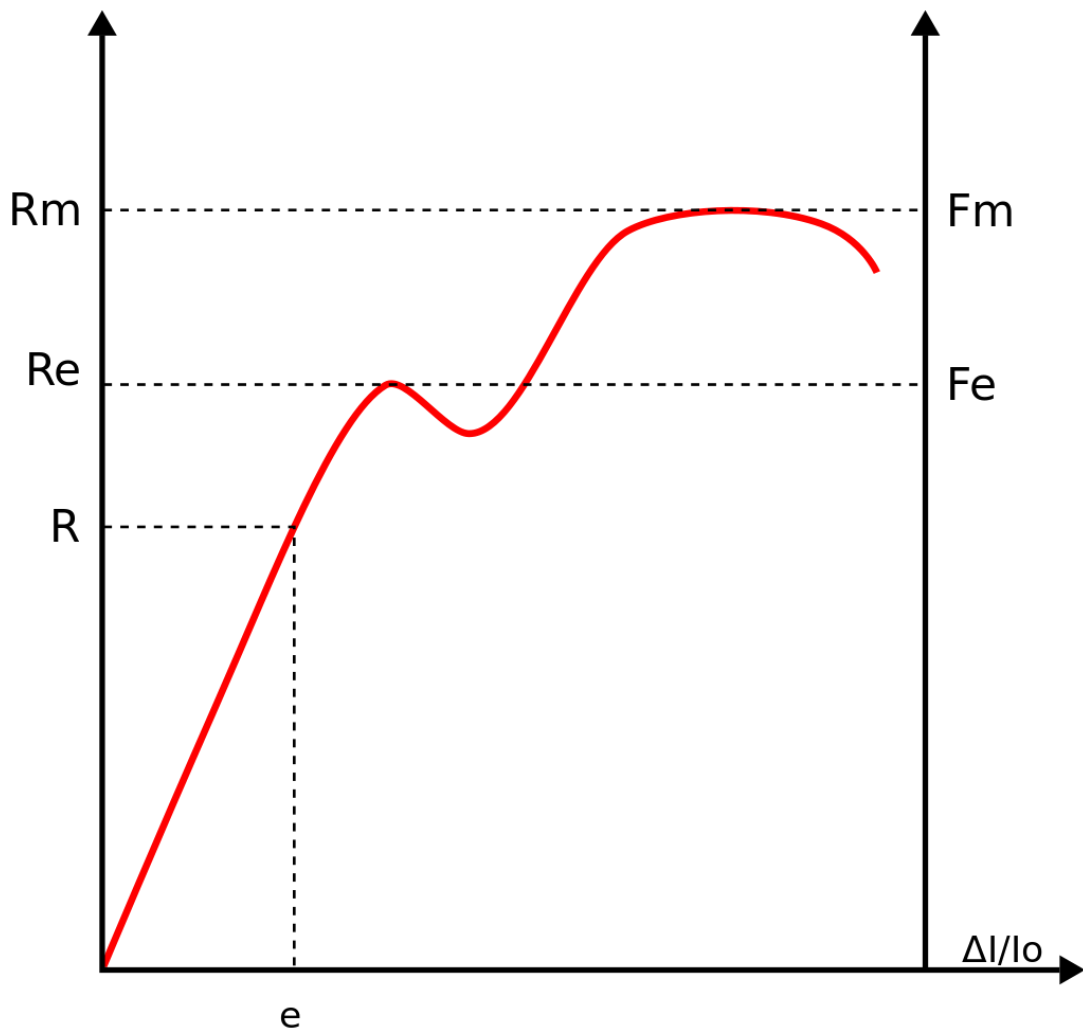


Рисунок 3.1 - Діаграма розтягу пластичного матеріалу
 При обчислюванні границі міцності, ми користуємось формулою

$$\sigma_B = \frac{R_m}{S_0} \quad (3.3)$$

де S_0 – це початкове значення площі, а R_m – це точка зусилля при розтяганні зразка, коли зона його деформації локалізується на невеликій його довжині. Це призводить до утворення місцевого звуження у вигляді шийки і до зменшення сили розтягування, попри те, що напруження у перерізі шийки безперервно зростає. R – сила розтягування.

σ_Y – (границя пружності або границя пропорційності в МПа, точки 2 і 3 на рис. 3.2) це найбільше напруження при навантаженні зразка матеріалу, до

якого матеріал поводить себе як пружне тіло і залежність між напруженням і деформацією описується лінійним співвідношенням (рис. 3.2), тобто, законом Гука. Знаючи цю величину ми можемо з точністю сказати яке максимальне навантаження ми можемо дати тілу і не оставити залишкових деформацій.

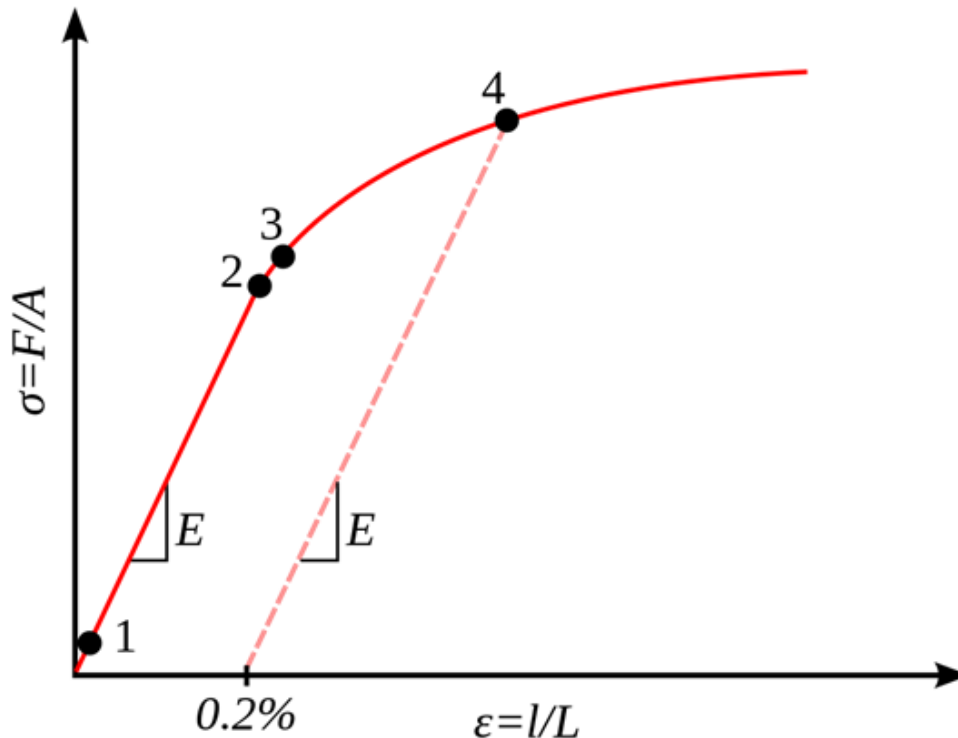


Рисунок 3.2 - Залежність напруги від деформації

Для того, щоб обчислити границю пружності ми використовуємо таку формулу

$$\sigma_Y = \frac{F_Y}{A_Y} \quad (3.4)$$

де F_Y [Н] — це навантаження на заготовку, а A_Y [м²] — площа заготовки при допустимій залишковій деформації.

δ — Відносне подовження при розриві характеризує зміну первісної довжини плівки при розтягуванні на момент розриву. Модуль пружності при розтягуванні характеризує рівень жорсткості матеріалу. Вимірюється у відсотках(%). Розраховується відносне подовження при розриві за формулою

$$\delta = (L_B - L_0) 100 / L_0 \quad (3.5)$$

де L_B — кінцева розрахункова довжина об'єкта після подовження і до розриву, а L_0 —початкова довжина.

Ψ — відносне звуження. Вимірюється в відсотках(%), а розраховується по формулі

$$\Psi = (F_0 - F_B) 100 / F_0 \quad (3.6)$$

де F_B — площа поперечного розрізу в місці розриву, а F_0 — початкова площа поперечного розрізу зразка.

KCV. Ударна в'язкість — здатність матеріалу поглинати механічну енергію в процесі деформації і руйнування під дією ударного навантаження. Ударна в'язкість характеризує схильність металу до крихкого руйнування, вона включає роботу зародження тріщини (a_z) та роботу поширення тріщини (a_p):

$$KC = a_z + a_p \quad (3.7)$$

Чим більша робота розповсюдження тріщини, тим менша можливість раптової крихкої руйнації.

Ударна в'язкість залежить від:

- розміру зерна металу – подрібнення зерна призводить до значного підвищення ударної в'язкості;
- наявності концентраторів напруг у виробі;
- природи матеріалу, особливостей його обробки, наявності шкідливих домішок, температури;
- швидкості деформації - швидкість вище, а ударна в'язкість нижче.

При зменшенні температури нижче за деяке граничне значення небезпека крихкого руйнування різко зростає. Поріг холодноламкості - це температура (інтервал температур), при якому відбувається перехід від в'язкого руйнування до крихкого, що супроводжується різким зниженням ударної в'язкості. Нижня

(t_n) і верхня (t_e) межі порога холодноломкості визначають у серії ударних випробувань при різних температурах (рис. 3.3).



Рисунок 3.3 -Залежність ударної в'язкості від температури сталі

1.2 Дослідження зразків на структурні характеристики

Досліджувані зразки виконані із сталі 09Г2. Позначення 09Г2 означає, що у сталі присутній 0,09% вуглецю, оскільки 09 йде до літер, далі слідує буква «Г» яка означає марганець, а цифра 2 – процентний вміст до 2% марганцю (табл.3.1).

Таблиця 3.1 - Хімічний склад сталі 09Г2 у відсотках

| C | Si | Mn | Ni | S | P | Cr | N | Cu | As | Fe |
|------------|-------------|-------------|-----------|------------|-------------|-----------|-------------|-----------|------------|------------|
| До 0.12 | 0.5- 0.8 | 1.3- 1.7 | До 0.3 | До 0.04 | До 0.035 | До 0.3 | До 0.008 | До 0.3 | До 0.08 | ~96- 97 |

Для вивчення зв'язку між фрактальний параметрами структури і механічними властивостями металу швів були проведені дослідження на зразках металу швів низьколегованої високоміцної сталі. Зварювання може

виконуватися і без підігріву, і з попереднім підігрівом до 100-120°C. Так як дана сталь є низьковуглецевою, її зварювання здійснюється без обмежень всіма доступними способами - ручним дуговим зварюванням, автоматичним дуговим зварюванням під флюсом та газовим захистом тощо. У процесі експерименту досліджували ударну в'язкість металу при різних температурах (від +20 до -40) на зразках зварних швів, які були отримані при зварюванні стикових з'єднань сталі 09Г2 дротом Св-08ГНМА в середовищі захисного газу М21.

Технологія зварювання в захисному середовищі із застосуванням зварювальних газових сумішей значно підвищує якість робіт та ефективність виконання зварювальних робіт. Газ **М21**- це суміш чистого аргону (Ar) та вуглекислого газу (CO₂), спеціально розроблена для зварювання марганцево-вуглецевих сталей металевим електродом у середовищі газу, а також для дугового зварювання марганцево-вуглецевих та нержавіючих сталей порошковим дротом у захисному газі.

Сталевий зварювальний дріт використовується для зварювання різних металоконструкцій, з'єднання деталей машин або зварювання труб та трубопроводів. Дріт **Св-08ГНМА**- поміднена сталева проволока проволока, застосовується для зварювання низьковуглецевих та низьколегованих сталей підвищеної та високої міцності, зварювання труб та металоконструкцій під шаром флюсу та в газовій суміші. Забезпечує утворення надійних та акуратних швів, гарантує стабільне горіння дуги.

Вихідні данні механічних характеристик за стандартом із марочника сталі 09Г2 наведені у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Механічні характеристики сталі 09Г2 до зварювання

| Темп. °С | σ_B (МПа) | σ_T (МПа) | δ (%) | ψ (%) |
|--|------------------|------------------|--------------|------------|
| Листи завтовшки 34 мм у стані постачання НВ δ 112-127 | | | | |
| 20 | 295 | 405 | 30 | 66 |
| 100 | 270 | 415 | 29 | 68 |

Схема будови структури металу зварних швів (рис.3.4) складається із чотирьох основних зон, у даній роботі досліджувалась перша зона – зона зварного шва. Структура даної зони відрізняється від зони основного металу, адже тут відбувався термічний вплив, при зварці дротом додалися додаткові вклучення та інші можливі чинники впливу.

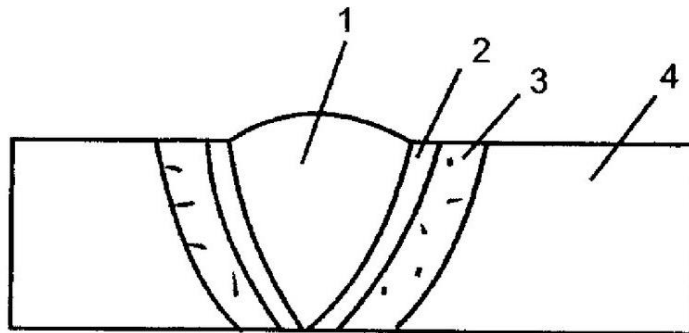


Рисунок 3.4 - Схема будови структури металу зварних швів: 1- зварний шов, 2 – зона сплавлення, 3 – зона термічного впливу (ЗТВ) зварювання, 4 – основний метал.

У таблиці 3.3 наведено результати механічних випробувань у діапазоні температур від 20 до – 40 °С.

Таблиця 3.3 - Результати механічних випробувань зразків

| | МПа | | % | | 20 | 0 | -20 | -40 |
|------------|------------|----------------|----------|--------|-----------------------------------|----|-----|-----|
| | σ_B | $\sigma_{0,2}$ | δ | ψ | KCV, Дж/см ² при T, °С | | | |
| Зр1 | 746 | 690 | 19 | 60 | 73 | 79 | 63 | 59 |

| | | | | | | | | |
|------------|-----|-----|----|----|-----|----|----|----|
| Зр2 | 715 | 644 | 19 | 63 | 112 | 93 | 85 | 73 |
| Зр3 | 712 | 580 | 5 | 15 | 55 | 47 | 40 | 33 |
| Зр4 | 726 | 650 | 21 | 62 | 85 | 72 | 65 | 61 |
| Зр5 | 709 | 636 | 19 | 57 | 85 | 72 | 60 | 50 |
| Зр6 | 728 | 621 | 17 | 54 | 82 | 58 | 50 | 36 |

Фрактальний аналіз структурних складових виконували на основі методика наведеної у розділі 2 цієї роботи. В якості бази даних використовували результати числової обробки зображень, які були отримані при металографічному аналізі зразків на оптичному мікроскопі НЕОРНОТ-32. Визначали фрактальний показник розгалуженості границь зерен при збільшені 1000(D_{1000}) та середній розмір зерна лінійним методом (таблиця 3.4), за допомогою програми ImageJ (додаток 1).

Таблиця 3.4 - Фрактальні та лінійні характеристики зразків

| Зразок | N | Середній розмір (μm) | Розмір | d, μm | D |
|--------|---|----------------------|--------|-------|------|
| Зр1 | 1 | 3,15 | 1,92 | 3,27 | 1,93 |
| | 2 | 2,80 | 1,93 | | |
| | 3 | 2,40 | 1,93 | | |

| | | | | | |
|-----|---|------|------|------|------|
| | 4 | 5,40 | 1,93 | | |
| | 5 | 2,60 | 1,92 | | |
| Зр2 | 1 | 5,10 | 1,93 | 4,13 | 1,92 |
| | 2 | 4,60 | 1,92 | | |
| | 3 | 2,70 | 1,92 | | |
| Зр3 | 1 | 3,20 | 1,90 | 2,93 | 1,90 |
| | 2 | 3,10 | 1,91 | | |
| | 3 | 2,50 | 1,90 | | |
| Зр4 | 1 | 2,80 | 1,88 | 5,07 | 1,86 |
| | 2 | 5,60 | 1,87 | | |
| | 3 | 6,80 | 1,83 | | |
| Зр5 | 1 | 5,20 | 1,91 | 4,30 | 1,91 |
| | 2 | 5,80 | 1,91 | | |
| | 3 | 3,90 | 1,91 | | |
| | 4 | 2,30 | 1,90 | | |
| Зр6 | 1 | 5,20 | 1,92 | 4,70 | 1,91 |
| | 2 | 5,10 | 1,90 | | |
| | 3 | 3,80 | 1,91 | | |

Для візуалізації можливості використання фрактальної розмірності та лінійного параметру розміра зерна для оцінювання механічних властивостей металу за результатами випробувань були побудовані графіки взаємозв'язку між ударною в'язкістю і фрактальної розмірності (рис. 3.5), розміром зерна та фрактальною розмірністю (рис. 3.6), границями міцності та текучості та фрактальною розмірністю (рис. 3.7).

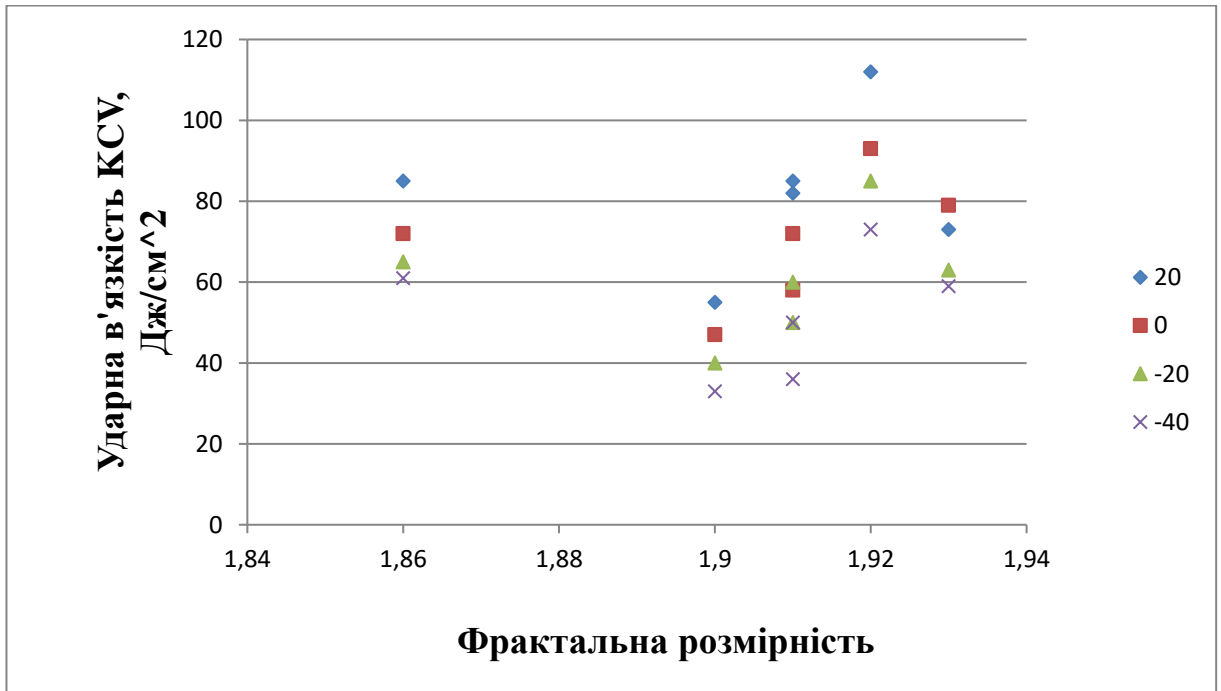


Рисунок 3.5 - Графік залежності ударної в'язкості і фрактальної розмірності

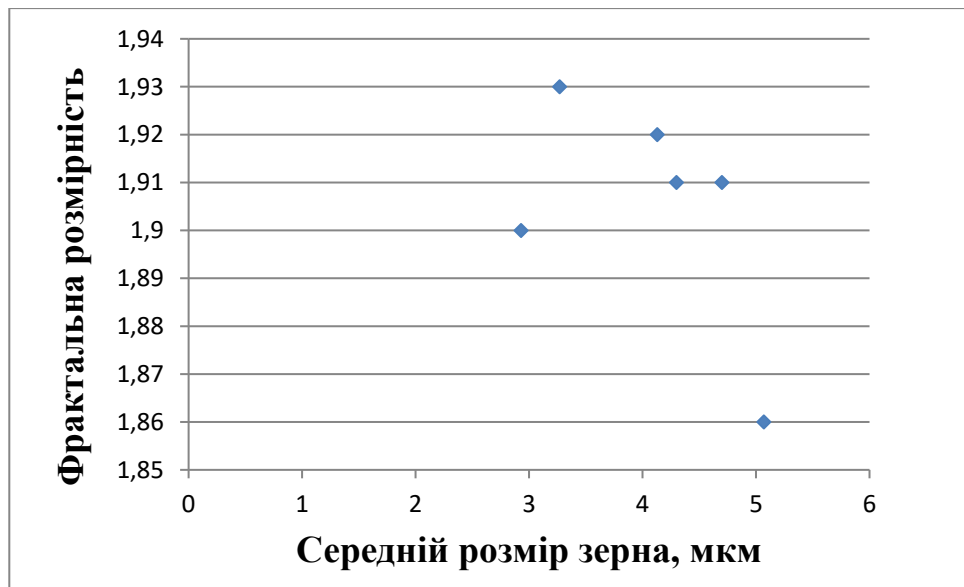


Рисунок 3.6 - Графік залежності фрактальної розмірності від середнього розміру зерна

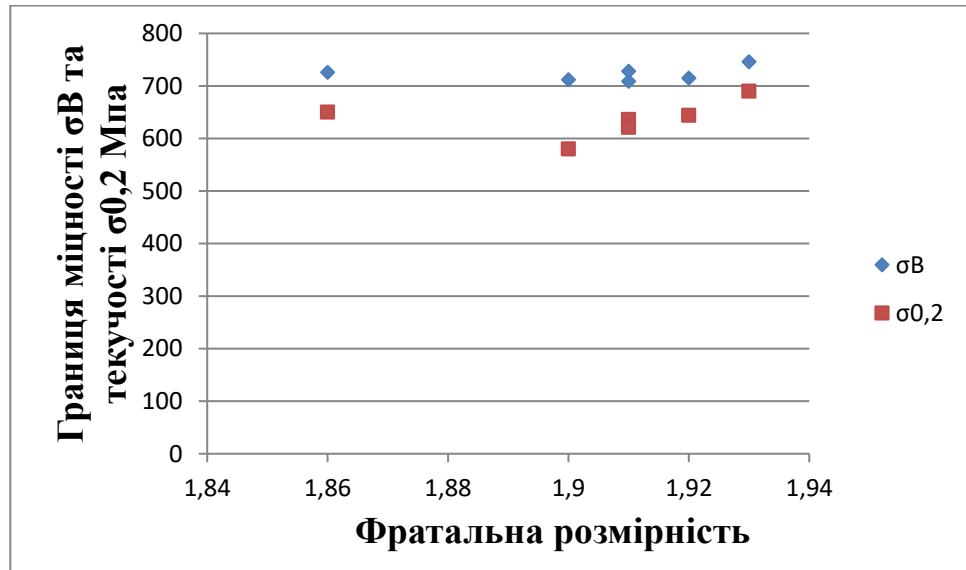


Рисунок 3.7 - Графік залежності границь міцності та текучості від фрактальної розмірності

Наведені на рис.3.5-3.7 залежності дають дуже загальне уявлення щодо впливу як середніх розмірів зерна так і меж зерен на механічні властивості металу зварних швів. Ці результати свідчать про необхідність залучення до фрактального аналізу показників, які описують морфологічні особливості мікроструктурних складових, розподіл неметалевих включень за розміром, рівень легування твердого розчину.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Описано основні механічні властивості, які досліджувались у роботі та показано стохастичний характер фрактального аналізу мікроструктури металу зварних швів.
2. Наведено приклади визначення показників фрактальності меж зерен в структурі металу зварних швів.
3. Встановлено необхідність застосування фрактального аналізу для опису впливу параметрів структури на механічні властивості зварних швів.

РОЗДІЛ 4 НЕМЕТАЛІЧНІ ВКЛЮЧЕННЯ ТА ЇХ ВНЕСОК У ВЛАСТИВОСТІ ЗРАЗКІВ

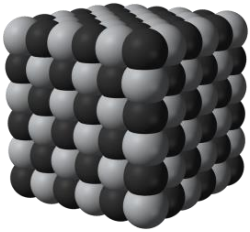
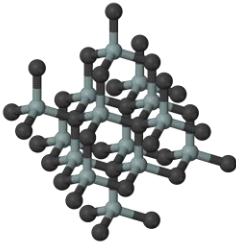
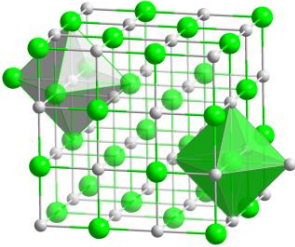
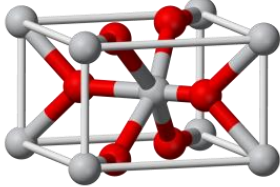
Неметалічні включення - це сторонні частки, що потрапили до сталі у процесі виробництва. Включення мають різний хімічний склад і по-різному впливають на механічні властивості сталі: пластичність, твердість, оброблюваність та корозійну стійкість. Як правило, чим менше неметалевих включень міститься в сталі, тим вища її якість. Проте, все частіше до зварних з'єднань примусово додають неметалічні включення, які називаються інокуляторами.

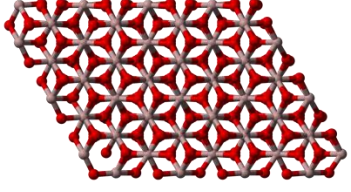
4.1 Досліджувані інокулятори

Інокулятори- частинки речовин, що вводяться в рідкий метал для зміни структури та утворення нових структурних складових. Інокулятори, що змінюють структуру називаються модифікаторами II роду.

У роботі досліджуються наступні інокулятори (табл. 4.1):

Таблиця 4.1 - Структури інокуляторів

| Структура | Молекулярна формула | Структура | Молекулярна формула |
|---|---------------------|--|---------------------|
|  | TiC |  | SiC |
|  | TiN |  | TiO ₂ |

| | | | |
|--|--|--|--------------------------------|
| | |  | Al ₂ O ₃ |
|--|--|--|--------------------------------|

Для зразків були застосовані різні інокулятори, або не застосовані взагалі (табл. 4.2):

Таблиця 4.2 - Зразок і відповідний йому інокулятор

| Зразок | Інокулятор | Повна назва інокулятора |
|--------|--------------------------------|---|
| Зр1 | – | |
| Зр2 | TiC | Карбід титану - хімічна сполука елементів титану і вуглецю. |
| Зр3 | TiN | Нітрид титану - бінарна хімічна сполука титану з Нітрогеном. |
| Зр4 | SiC | Карбід кремнію - бінарна неорганічна сполука кремнію з вуглецем. |
| Зр5 | TiO ₂ | Оксид титану - неорганічна бінарна сполука. |
| Зр6 | Al ₂ O ₃ | Алюміній оксид - неорганічна сполука Алюмінію з Оксигеном. |

Одним із нагальних питань є вплив неметалевих включень на якість зварного з'єднання та металу в цілому. При огляді літератури було виявлено, що автори часто уникають питань впливу неметалевих включень на якість зварного з'єднання, а також питання кінетики зародження та укрупнення неметалевих включень у зварювальній ванні. Деякі автори розглядають питання щодо шляхів зниження вмісту неметалевих включень у зварному з'єднанні, а інші щодо введенню додаткових неметалічних включень певного

складу. Виникають питання і щодо отримання таких включень, форма і розміри яких не впливали б істотно на якість шва. Отже, актуальність даної роботи полягає у дослідженні впливу неметалічних включень у структурі металу на механічні характеристики зразку.

Таблиця 4.3–Класифікація включень

| За походженням | За хімічним складом | За часом утворення | За формою |
|--|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • екзогені • ендогені | <ul style="list-style-type: none"> • оксиди • сульфідиди • нітриди • фосфідиди | <ul style="list-style-type: none"> • первинні • вторинні • третинні • післякристалі заційні | <ul style="list-style-type: none"> • гостокутні • глобулярні • плівки (плёночные) |

Неметалічні включення можуть бути представлені як порожнечі в шві металу, що заповнені неметалевими речовинами згідно походження. Неметалічні включення можна розділити на включення, які утворюються в металі зварювальної ванни в результаті різних фізико-хімічних процесів, і включення, що вносяться в зварювальну ванну ззовні. Більшість неметалевих включень відноситься до першої групи та їх утворенню сприяє збагачення рідкого металу домішками внаслідок ліквідаційних явищ та зниження спільної розчинності домішок при охолодженні зварювальної металу ванни. Ззовні неметалеві включення можуть бути внесені в результаті переходу в зварювальну ванну частини розплавленого покриття у вигляді окремих крапель або разом з електродним металом за рахунок переходу оксидів, що знаходяться на поверхні деталей, що зварюються, або неповного видалення шлаків з поверхні попереднього валика.

4.2 Дослідження зразків на вміст неметалічних включень

В якості вихідного матеріала використовували зразки, приведені вище (табл.4.2, табл. 3.4). Розглядалися зразки із модифікаторами та без них, модифікація проводилась різними інокуляторами: TiC, TiN, SiC, TiO₂, Al₂O₃. У даному експерименті розглядалися включення всіх розмірів. На початковому етапі оброблялась фотографія (рис. 4.1) та до неї застосовувалась програма написана на Python (додаток 1). Задачею було виявити включення на зображенні та ідентифікувати їх.

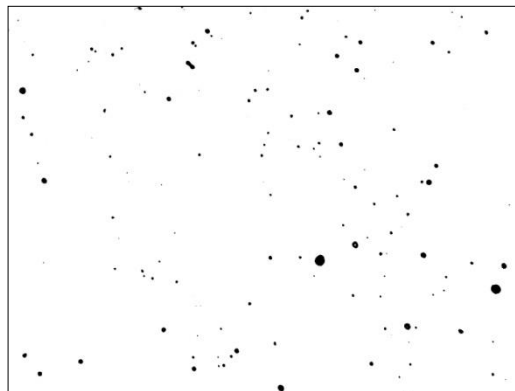


Рисунок 4.1 - Фотографія неметалічних включень при збільшені у 1000 разів

На рис. 4.2 наведено результат обробки зображення і пошук включення. Саме включення на рисунку – більш світле, насправді це бінарне зображення, яке несе у собі значення «1» та «0». Білі пік селі зображення були ідентифіковані як «1», а самі включення – чорного кольору ідентифіковані як «0».

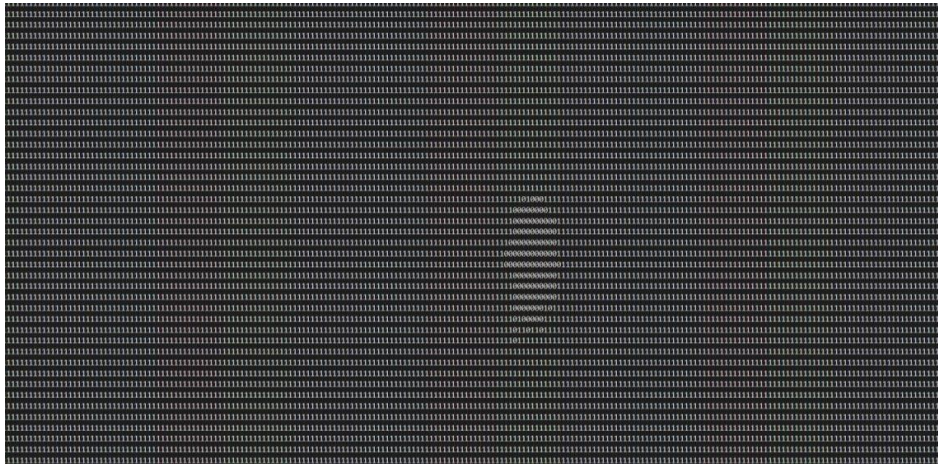


Рисунок 4.2 - Приклад ідентифікації включення на зразку при збільшенні

Включення розподілені рівномірно по всьому об'єму металу і субмікроскопічні частинки, приносять найменшу шкоду, у ряді випадків є корисними. Отже, було досліджено розподіл неметалевих включень по площі зразку. Початковим етапом була зарача у пошуку включень (по координатах) та дослідження їх площі (кількості пікселів, що вони займають). Код програми наведений у додатку 2, і відповідні дані (частина отриманих даних наведена у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Отримані дані щодо розташування включень

| Кількість пікселів у включенні(Площа) | Координати центру по x | Координати центру по y |
|---------------------------------------|------------------------|------------------------|
| 99 | 4.39394 | 874.444 |
| 258 | 11.093 | 661.357 |
| 1 | 9 | 646 |
| 1 | 9 | 1292 |
| 17 | 12.4118 | 642.412 |
| 1 | 14 | 645 |
| 7 | 16.2857 | 637.143 |

| | | |
|-----|---------|---------|
| 13 | 17.2308 | 885.231 |
| 23 | 20.8261 | 1844.26 |
| 130 | 24.3154 | 1505.73 |

Неметалічні включення (інокулятори) найчастіше позитивно впливають на властивості сталі. Вони відіграють корисну роль при виділенні у вигляді дрібнодисперсної фази, розташованої рівномірно по всьому об'єму металу. Для цього не потрібно великий вмісту маси включень у сталі. Низький вміст включень у сталі - не є гарантією високої якості. При загальній малій кількості включень в окремих місцях зливки можуть бути накопичення включень.

Різний вплив на механічні властивості сталей дають різні включення при випробуванні зразків, вирізаних уздовж осі прокатки (поздовжні зразки) та поперек (поперечні зразки). Наявність неметалевих включень особливо помітно позначається показниках випробувань поперечних зразків, які ми і досліджуємо.

Взаємне розташування або розподіл включень по площі зразка обраховано, як відносність координат від певного досліджуваного включення до наступних (табл. 4.4). Програма обрахунку відносності координат написана на Python – у додатку 3.

Таблиця. 4.4 - Відносні координати включень і-го до j-го.

| X_i | Y_i | x_j | y_j | Відстань l , рх |
|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| 4.39394 | 874.444 | 11.093 | 661.357 | 198.52 |
| 4.39394 | 874.444 | 9.0 | 646.0 | 222.31 |
| 4.39394 | 874.444 | 9.0 | 1292.0 | 411.40 |
| 4.39394 | 874.444 | 12.4118 | 642.412 | 224.23 |
| 4.39394 | 874.444 | 14.0 | 645.0 | 223.47 |

| | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 4.39394 | 874.444 | 16.2857 | 637.143 | 230.49 |
| 4.39394 | 874.444 | 17.2308 | 885.231 | 9.12 |
| 4.39394 | 874.444 | 20.8261 | 1844.26 | 961.64 |
| 4.39394 | 874.444 | 24.3154 | 1505.73 | 619.55 |
| 4.39394 | 874.444 | 31.1 | 2232.0 | 1349.11 |

4.3 Дослідження зразків на розподіл неметалічних включень

Розподіл неметалічний включень (інокуляторів) має одне із головних значень для зварних з'єднань, адже за допомогою них є можливість змінювати механічні властивості зразка, а в подальшому і всієї деталі в цілому.

Для пришвидшення роботи із розподілом включень у потрібних діапазонах була написана програма (Додаток 4), яка у заданих діапазонах обраховує кількість включень і таким чином є можливість зв'язати розподіл включень у діапазонах за розміром із їх кількістю та проаналізувати вплив тих чи інших на фрактальну розмірність та механічні властивості. Дані обрахунки в подальшому дають змогу провести кореляцію між структурними складовими – їх впливом на механічні властивості та на фрактальну розмірність.

Неметалічні включення мають визначальний вплив на характер руйнування сталі. Зародження тріщин у неметалевих включень зазвичай відбувається або в результаті руйнування включення і переході тріщини з нього в метал, або при відділенні включення від металевої матриці з подальшим збільшенням порожнини, що утворилася. Первинні мікротріщини утворюються навколо найбільших (понад 10 мкм) включень, таких як MnS, CaS, Al_2O_3 (зразок 5 табл 4.2), SiO_2 .

Ступінь впливу включень у процеси в'язкого та крихкого руйнування істотно різний. Це пов'язано із енергоємністю в'язкого і крихкого руйнувань, та визначається різними параметрами. Вплив включень на в'язке руйнування сталі проявляється у механізмі утворення та злиття мікропор, що зароджуються на неметалевих включеннях. Крихкі руйнування пов'язані з наявністю внутрішніх дефектів з

розміром більшим за критичний. Якщо розмір включень становить 5-10 мкм і більше, небезпека крихкого руйнування зростає. Особливо небезпечні оксиди та нітриди, що виділяються по межах аустенітних зерен.

Таблиця. 4.5 –Кількості включень у відповідних діапазонах розмірів

| Діапазон розміру, мкм Зразок | 0 ... 0.3 | 0.3 ... 0.5: | 0.5 ... 0.8: | 0.8 ... ∞ |
|------------------------------------|-------------|--------------|--------------|------------|
| Зр1 | 70 | 5 | 10 | 121 |
| Зр2 | 1074 | 4 | 5 | 145 |
| Зр3 | 1940 | 11 | 17 | 229 |
| Зр4 | 1041 | 10 | 9 | 184 |

Кількість включень та їх розподіл у діапазонах розмірів від 0 до 0,3 мкм, від 0,3 мкм до 0,5 мкм, від 0,5 мкм до 0,8 мкм та >0,8 мкм був проведений для 4х зразків таблиці 3.3. Найбільшу увагу привернув зразок 3, адже за всіма механічними характеристиками він має найменші значення, проте переважає у кількості включень у кожному з обраних діапазонів (рис.4.3).

Проте неметалічні включення є однією із структурних складових зразка, отже для повноти опису необхідно розглядати як неметалічні включення, так і структуру зразка, а також фізико-хімічні параметри взаємодії на енергетичному рівні.

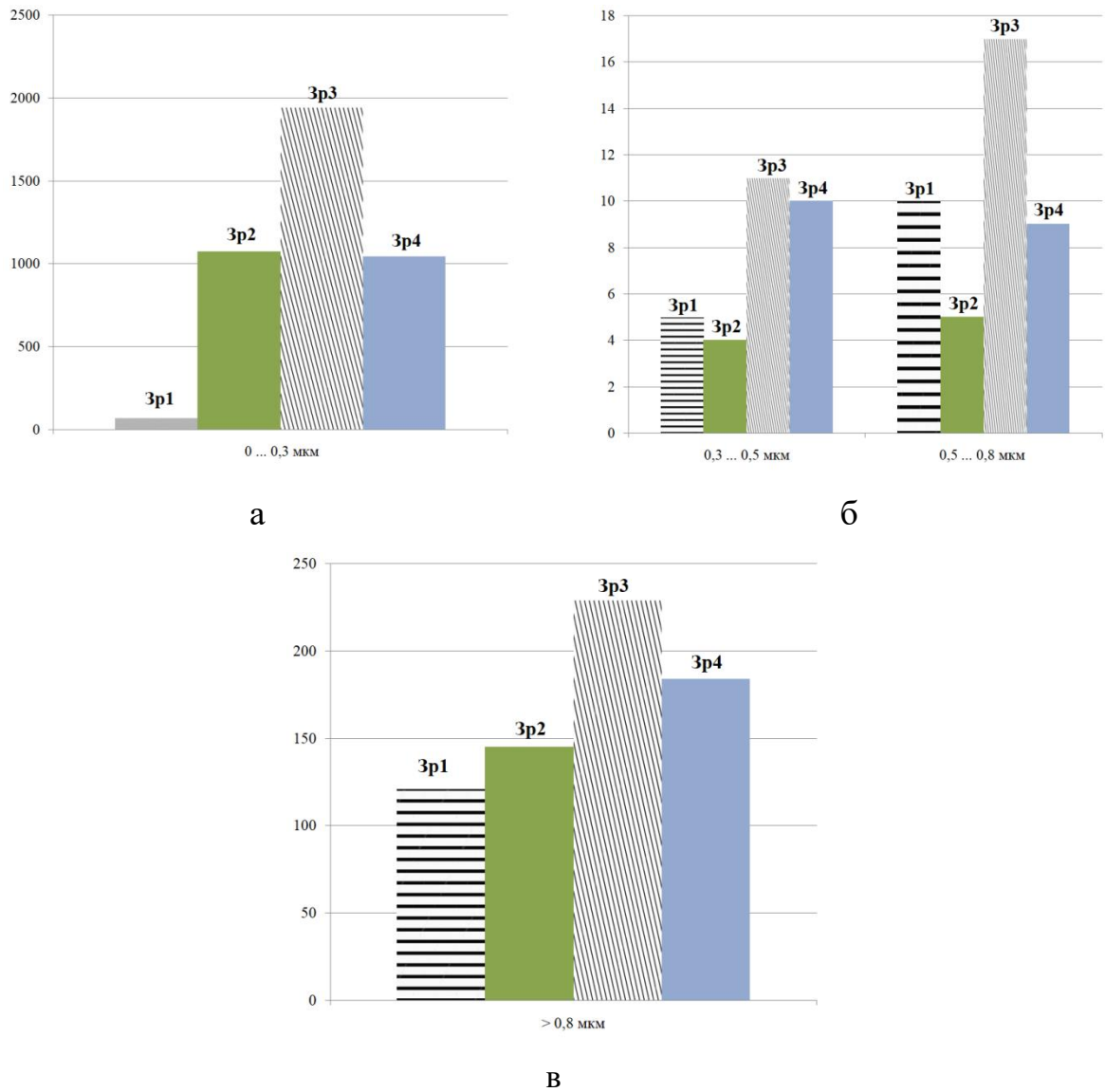


Рисунок 4.3. Розподіл кількості включень на зразках по діапазонах: а - від 0 до 0,3 мкм; б - від 0,3 мкм до 0,5 мкм та від 0,5 мкм до 0,8 мкм; в - >0,8 мкм

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

1. Описано, що аналіз та документування неметалевих включень є важливим етапом контролю якості;
2. Отримані дані, які в подальшому дозволять спрогнозувати та діагностувати зміни механічних властивостей зразка.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Встановлено необхідність застосування фрактального аналізу для опису впливу параметрів структури на механічні властивості зварних швів із сталі 09Г2.
2. Вперше встановлено кореляційні залежності, які пов'язують фізико-механічні характеристики сталі 09Г2 із фрактальними розмінностями. Показано, що існує залежність фрактальної розмірності із ударною в'язкістю, середнім розміром зерна та межами міцності та текучості.
3. Вперше для сталі 09Г2 встановлено кореляційні залежності середньої фрактальної розмірності меж зерен з ударною в'язкістю КСВ при -40°C до 20°C , а також границями плинності $\sigma_{0,2}$ і міцності σ_B .
4. Охарактеризовано вплив неметалічних включень та границь зерен на характеристики металу.

Перелік джерел посилання

1. Б.Е. Патон, Л.М. Лобанов, А.Я. Недосека «Техническая диагностика вчера, сегодня и завтра». Техническая диагностика и неразрушающий контроль, № 4, 2003, 10с.
2. Mandelbrot B.B. Self-affine fractals and fractal dimension. Phys. Phys. Scr., 1985. N32. P. 257- 260
3. B. Mandelbrot, Fractal Geometry of Nature. New York (NY): W.H. Freeman and Co., (1983), ISBN-13: 978-0910321648
4. Большаков В. И. Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла / В. И. Большаков, В. Н. Волчук, Ю. И. Дубров // Доповіді Національної академії наук України. - 2017. - № 4. - С. 42-48.
5. Штофель О.А., Рабкина М.Д. Использование мультифрактального анализа для оценки свойств конструкционных сталей. Universum: Технические науки: электрон. Научн. Журн. 2016. – №10(31) ISSN:2311-5122 (eLIBRARY.RU, EBSCODiscovery, GoogleScholar)
6. В.И. Большаков, В.Н. Волчук, Ю.И. Дубров, Топологические и фрактальные инварианты структуры для оценки качества металла// Представлено академиком НАН Украины А.Ф. Булатом 2017. № 4.- С 42-48.
7. Кривоносова Е.А. Применение теории фракталов в металловедении сварки и покрытий // Сварка и диагностика. - 2008. - № 1. - С. 2-5.
8. И. Е. Красикова, И. В. Красиков, В. В. Каргузов, В. Б. Муратов, А. А. Васильев Мультифрактальные характеристики горячепрессованных композитов из нанопорошков $AlB_{12}-AlN$ // Наносистемы, наноматериали, нанотехнології.- 2020, т. 18, № 1, сс. 89–9.
9. О. О. Сердюк СУЧАСНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ

- ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ// Донбаська державна машинобудівна академія// Краматорськ : ДДМА, 2018. – 120 с.
- 10.Игудесман Константин Борисович, Фрактальная геометрия// Казанский государственный университет Казань, 2010.
 - 11.Салтыков С.А. Стереометрическая металлография. - 3-е изд. - М.: Металлургия, 1970, 376 с., ил.
 - 12.МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ И ПРОЦЕССОВ: Методические указания для самостоятельной работы / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. Л.Г. Борисова. СПб, 2016. 63 с.
 - 13.Методы исследования материалов и процессов: учеб. пособие / Н.Н. Степанова. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ–УПИ, 2006. – 133 с.
 - 14.Бернштейн М.Л., Рахштадт А.Г. Металловедение и термическая обработка стали, т.1. М., Металловедение, 1961
 - 15.Мандельброт Б.. Фрактальная геометрия природы = TheFractalGeometryofNature. — М.: Институт компьютерных исследований, 2002. — 656 с. — ISBN 5-93972-108-7.
 - 16.Федер Е. Фракталы: Пер. с англ. — М.: Мир, 1991. — 254 с.
 - 17.Божокин С.В. Фракталы и мультифракталы: Учебное пособие/ С.В. Божокин, Д.А. Паршин – Москва–Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.
 - 18.Кроновер Р.М. Фракталы и хаос в динамических системах. Основы теории. Учебное пособие. Москва: Постмаркет, 2000. — 352 с.
 - 19.Синергетика и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С., Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев; [Отв. ред. Н.П. Лякишев]; Рос.акад. наук. Ин-т металлургии им. А.А. Байкова. - Москва : Наука, 1994. – 382 с.

20. Гуляев А.П. *Металловедение*. - М.: *Металлургия*, 1977. - УДК669.0(075.8)
21. Holder M., Tsvetkov I. *Analysis of the Dow-Jones Industrial Average (DJIA): Index Dynamics by Fractal Analysis Methods*. Proc. of Vth Intern. Congr. of math. modeling. Dubna. 2002. Vol. 2. 150 p.
22. W. Guttinger and D. Dangelmayr, (eds.), *The Physics of Structure Formation*, Berlin, Springer-Verlag, 1987.
23. Пайтген Х.-О., Рихтер П.Х., *Красота фракталов*, М., Мир, 1993.
24. Карпов В.Г., Субашиев А.В., *Что такое фракталы?* ЛПИ, 1989.
25. Е. Федер, *Фракталы* М., Мир, 1991.
26. F. Family, T. Vicsek, *Dynamics of Fractal Surfaces*, Singapore, World Scientific, 1991.
27. B.J. Strait, T.G. Dewey *Multifractals and decoded walks: applications to protein sequence correlations* // *Phys. Rev. E*. -1995. V. 52. - P. 6588.
28. C.L. Berthelsen, J.A. Glazier, S. Raghavachari *Effective multifractal spectrum of a random walk* // *Phys. Rev. E*. 1994. - V. 49. - P. 1860.
29. J.A. Glazier, S. Raghavachari, C.L. Berthelsen, M.H. Skolnick *Reconstructing phylogeny from the multifractal spectrum of mitochondrial DNA* // *Phys. Rev. E*. 1995. - V. 51. - P. 2665.
30. S.I. Vainshtein, K.R. Sreenivasan, R.T. Pierrehumbert, V. Kashyap, A. Juneja *Scaling exponents for turbulence and other random processes and their relationships with multifractal structure* // *Phys. Rev. E*. 1994. - V. 50. - P. 1823.
31. E. Eisenberg, A. Bunde, S. Havlin, H.E. Roman *Range of multifractality for random walks on random fractals* // *Phys. Rev. E*. -1993. V. 47. - P.2333.
32. Olha Shtofel, Viktor Golovko, Tetiana Chyzhska *Фрактальний та металографічний аналізи як інноватика у забезпеченні якості металеві*

- продукції, Innovative «Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific Research and Technological Processes», Wydawnictwo Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach, 2021. - 1013-1018p. (ISBN 978-83-957298-6-7)
- 33.Кіріченко Л.О., Радівілова Т.А. Фрактальний аналіз самоподібних і мультифрактальних часових рядів – Харків, ХНУРЕ, 2019. - 106 с.
- 34.Хакен Г. Синергетика. — М.: Мир, 1980. — 406 с.
- 35.Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах: От диссипативных структур к упорядоченности через флуктуации. — М.: Мир, 1979. — 512 с. 1018
- 36.Мандельброт Б. Фракталы и хаос. Множество Мандельброта и другие чудеса // Бенуа Мандельброт. — Ижевск,: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2009. — 392 с.
- 37.Штофель О.О. Застосування методу фрактального аналізу до вивчення структури металу, Metalozn. obrobkamet., 2019, Tom 91, No. 3, ss. 40-46
- 38.Shtofel Olha O., Chizhskaya Tetiana G, Kulieznova Svitlana S. Metallographic studies of vessel steel samples: ДС, 35Г / 40Г and steel 20 by fractal analysis, Journal of Multidisciplinary Engineering Science Studies (JMESS) ISSN: 2458-925X Vol. 6 Issue 2, February – 2020
- 39.Штофель О. О., Рабкина М. Д Застосування методу фрактального аналізу до вивчення зміни властивостей металу. Вісник КПІ. Серія ПРИЛАДОБУДУВАННЯ, Вип. 58(2), 2019. ISSN (Online) 2663-3450, ISSN (Print) 0321-2211
- 40.Головко В.В., Кузнецов В.Д., Фомічов С.К., Лобода П.І. Нанотехнології у зварюванні низьколегованих високоміцних сталей. Київ; Видавництво «Політехніка», 2016. 240 с.
- 41.Пояркова Е.В. Фрактальный анализ в диагностике структур

- материалов: методические указания / Е.В. Пояркова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ 2019. – 47с.
- 42.Штофель О. О., Чижська Т. Г. Підготовка металевого зразка до вивчення його мікроструктури методом фрактального аналізу. - Інноваційні вектори розвитку сучасних наукових досліджень: XXI Міжнародна науково-практична інтернет-конференція: тези доповідей, Харків, 11 жовтня 2019 р. – Ч. 1. – Дніпро: ГО «НОК», 2019 – с. 48-54
- 43.Аникина, В. И. Фрактография в материаловедении [Электронный ресурс] : учеб. пособие / В. И. Аникина, А. А. Ковалева. – Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2014. – 144 с. - ISBN 978-5-7638-3114-6.
- 44.Mandelbrot B.B. Self-affine fractals and fractal dimension. Phys. Phys. Scr., 1985. N32. P. 257-260.
- 45.Mandelbrot, B.B.; Passoja, D.E.; Paullay, A.J. Fractal character of fracture surfaces of metals. Nature, 1984. Vol. 308. N. 19. P. 721-722.
- 46.Иванова В.С., Синергетика: Прочность и разрушение металлических материалов. М.: Наука, 1992. 155 с.
- 47.OlgaShtopfel, MarjanaRabkinaЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ФРАКТАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДО ВИВЧЕННЯ ЗМІНИ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУ. Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування 58 (2),2019 – с.28-33.
- 48.ГОСТ 1778-70 Сталь. Металлографические методы определения неметаллических включений. Электронный ресурс <http://gostrf.com/normadata/1/4294835/4294835064.pdf>
- 49.ГОСТ 5639-82 Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна (с Изменением N 1). Электронный ресурс <http://docs.cntd.ru/document/1200005473>

- 50.Красікова І.Є. Нові кількісні методи визначення структури матеріалів у електронній мікроскопії. – Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата фізико-математичних наук за спеціальністю 01.04.07 –фізика твердого тіла – Інститут проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України, Київ, 2021.
- 51.Штофель О.О., Головка В.В., Чижська Т.Г. Застосування фрактального та металографічного аналізів для оцінки якості металу зварних швів // Автоматичне зварювання. – 2021. – № 5. – С. 70-74. <https://doi.org/10.37434/as2021.05.11>
- 52.Штофель О.О. Вдосконалення методу фрактального аналізу для оцінки взаємозв'язку структури і властивостей конструкційних сталей. –Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.16. 01 – «Металознавство та термічна обробка металів». –Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.
- 53.Shtofel O., Holovko V., Chyzhska T.Фрактальний та металографічний аналізи як інноватика у забезпеченні якості металевої продукції.Innovative «Approaches to Ensuring the Quality of Education, Scientific Research and Technological Processes» / Publisher: Polska : Publishing House of University of Technology, Katowice, 2021. – pp. 1013-1018.
ISBN 978 – 83 – 957298 – 6 – 7.
- 54.Головка В.В., Степанюк С.М., Єрмоленко Д.Ю. Дослідження впливу наноутворень в металі на формування мікроструктури зварного шва та

його механічні властивості // Строительство, материаловедение, машиностроение: Сб. науч. трудов. – 2012. – Вып. 64– С.155- 159.

55.Головко В.В. Походня И.К. Влияние неметаллических включений на формирование структуры металла сварных швов высокопрочных низколегированных сталей // Автоматическая сварка. – 2013. – №6. С. 3-11.

56.Журавель І.М. “Аналіз текстури фрактографічних зображень на основі спектра фрактальних розмірностей Реньї” // Штучний інтелект, - 2013. - №1. С. 204-208. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України, м. Львів Україна.Режим доступу:

<http://dspace.nbuu.gov.ua/bitstream/handle/123456789/85224/27-Zhuravel.pdf?sequence=1>

ДОДАТОК 1**ПРОГРАМА НА ПАЙТОНІ ЩО ОБРОБЛЯЄ ЗОБРАЖЕННЯ У
БІНАРНЕ**

```
from PIL import Image #підключаємо завантажений модуль

img = Image.open(r"/Users/mstekh/desktop/kpi/ph2.jpg") #відкриваємо
зображення за допомогою модуля
img = img.convert("1") #за допомогою функції конверт перетворюємо
зображення в монохромне, тут пікселі представлені лише як 255 або 0
(width, height) = img.size #отримуємо розмір зображення в пікселях
data = list(img.getdata()) #отримуємо інформацію про зображення у вигляді
структури даних - список (аналог масиву)
f = open(r"/Users/mstekh/desktop/kpi/ph2.txt", "w") #створюємо та
відкриваємо для роботи текстовий файл в який зберігатимемо інформацію у
вигляді "0" та "1"
count = 0 #створюємо змінну яка рахуватиме кількість елементів в рядку
(width)
for i in data: #за допомогою циклу представляємо кожен елемент
отриманого списку у вигляді окремої змінної
    if i == 255: #якщо це білий колір
        f.write('1') #записуємо його у файл як цифру 1
    if i == 0: #якщо це чорний колір
        f.write('0') #то записуємо у файл 0
    count += 1 #після кожного запису рахуємо символ
    if count == width: #якщо довжина рядку співпадає з шириною зображення
        count = 0 #обнуляємо дільник
        f.write('\n') #та ставимо ентер (переносимо курсор на новий рядок)
f.close() #після запису усіх значень у файл закриваємо файл.
```

ДОДАТОК 2

**ПРОГРАМА ЩО ЗНАХОДИТЬ СЕРЕДНЄ АРИФМЕТИЧНЕ X ТА У
КОЖНОГО ВКЛЮЧЕННЯ А ТАКОЖ ЗАГАЛЬНУ
КІЛЬКІСТЬ ПКСЕЛІВ У ЦЬОМУ ВКЛЮЧЕННІ**

```

#pragma stacksize 2g
#include <bits/stdc++.h>
using namespace std;
typedef function<void (int, int)> handler_t; // Оголошення типу функції,
що приймає два значення типу int без значення, що повертається
typedef function<bool (int, int, int, int)> transition_t; //
Оголошення типу функції, що приймає чотири значення типу int, що повертає
bool
int n, m; // Оголошення змінних ширини та висоти оброблюваного масиву
char **visited = nullptr; // Оголошення покажчика char другого порядку для
відвідуваних осередків
char **image = nullptr; // Оголошення покажчика char другого порядку для
зчитуваних осередків
void reset_matrix(char**& matrix) { // Оголошення функції очищення
матриці
    assert(matrix); // Перевірка покажчика матриці
    for (int i = 0; i < n; ++i) { // Цикл проходження по висоті
        for (int j = 0; j < m; ++j) { // Цикл проходження по ширині
            matrix[i][j] = false; // Привласнення початкового значення осередку
в проході
        }
    }
}
void initialize_matrix(char**& matrix) { // Оголошення функції ініціалізації
матриці
    matrix = new char*[n]; // Привласнення виділеного масиву покажчиків на
char розміру n покажчику матриці
    for (int i = 0; i < n; ++i) { // Цикл проходження масивом покажчиків
        matrix[i] = new char[m]; // Привласнення виділеного масиву змінних
типу char осередку в проході
    }
}

```

```

    reset_matrix(matrix); // Очищення виділеної матриці
}
void visit_handler(int x, int y) { // Оголошення функції обробки відвідування
комірки матриці
    visited[x][y] = true; // Привласнення осередку масиву відвідувань за
переданими координатами значення true
}
handler_t combine_handlers(handler_t first, handler_t second) { //
Оголошення функції суміщення функцій обробки
return [first, second](int x, int y) { //
Повернення лямбда вираження сумісної дії двох переданих обробників
    first(x, y);
    second(x, y);
};
}
transition_t combine_transitions(transition_t first, transition_t second) { //
Оголошення функції суміщення функцій перевірки переміщення
return [first, second](int x1, int y1, int x2, int y2) { //
Повернення лямбда виразу,
що поєднує дві передані функції перевірки переміщення
    return first(x1, y1, x2, y2) && second(x1, y1, x2, y2);
};
}
bool __correct_cell_transition(int n, int m, int x, int y) { //
Оголошення функції перевірки переміщення на коректність,
вихід за рамками матриці
    return x >= 0 && x < n && y >= 0 && y < m; // Повернення перевірки другої
пари координат на приналежність x діапазону від 0 до n - 1,
// та y діапазону від 0 до m - 1
}
bool __same_color_transition(int x1, int y1, int x2, int y2) { // Оголошення
функції перевірки одноколірності осередків за переданими парами координат
return (x1 == -1 && y1 == -1) || image[x1][y1] == image[x2][y2]; //
Повернення результату перевірки першого осередку на коректність та
// порівняння кольору першого
осередку з другим
}

```

```

    bool __not_visited_transition(int, int, int x, int y) { // Оголошення функції
перевірки переміщення на відвідуваність
        return !visited[x][y]; // Повернення значення матриці відвідувань по
другій парі координат
    }
    transition_t          not_visited_transition          =
combine_transitions(__correct_cell_transition,    __not_visited_transition); //
Оголошення суміщеної функції перевірки відвідування та коректності координат
    transition_t          same_color_transition          =
combine_transitions(__correct_cell_transition,    __same_color_transition); //
Оголошення суміщеної функції перевірки одноколірності та коректності координат
    transition_t          same_color_not_visited_transition =
combine_transitions(same_color_transition,    __not_visited_transition); //
Оголошення суміщеної функції перевірки одноколірності,
відвідування та коректності координат
    int bfs(int x, int y) { // Оголошення функції пошуку в ширі заданих координат,
що повертає кількість одноколірних осередків в області
        queue<pair<int, int>> current; // Оголошення черги проходу
        current.push(make_pair(x, y)); // Додавання в чергу переданих координат
        int total = 0; // Оголошення лічильника кількості осередків в області
        while (!current.empty()) { // Цикл проходу по черзі
        queue<pair<int, int>> next;
            while (!current.empty()) { // Цикл додавання сусідніх клітин
                ++total; // Збільшення лічильника на 1
                auto v = current.front(); // Оголошення змінної типу типу,
що автоматично визначається, з присвоєнням їй поточної пари з черги
                current.pop(); // Видалення з черги першого елемента
                int x = v.first, y = v.second; // Привласнення координат поточної пари
оголошеним змінним
                if (same_color_not_visited_transition(x, y, x + 1, y)) { // Перевірка
одноколірності, відвідування та коректності осередку під поточною
                    visit_handler(x + 1, y); // Відзначаємо осередок знизу відвіданого
                    next.push(make_pair(x + 1, y)); // Додаємо комірку знизу в чергу
                }
                if (same_color_not_visited_transition(x, y, x - 1, y)) { // Перевірка
одноколірності, відвідування та коректності комірки над поточною

```

```

        visit_handler(x - 1, y); // Відзначаємо осередок зверху відвіданого
        next.push(make_pair(x - 1, y)); // Додаємо осередок зверху в чергу
    }
    if (same_color_not_visited_transition(x, y, x, y + 1)) { // Перевірка
одноколірності, відвідування та коректності комірки праворуч від поточної
        visit_handler(x, y + 1); // Відзначаємо осередок праворуч
відвіданим
        next.push(make_pair(x, y + 1)); // Додаємо комірку праворуч у
чергу
    }
    if (same_color_not_visited_transition(x, y, x, y - 1)) { // Перевірка
одноколірності, відвідування та коректності осередку зліва від поточного
        visit_handler(x, y - 1); // Відзначаємо осередок зліва відвіданого
        next.push(make_pair(x, y - 1)); // Додаємо комірку зліва в чергу
    }
}
current = next; // Переходимо до наступної у черзі пари координат
}
return total; // Повернення кількості пройдених осередків
}

```

```

int dfs(int x1, int y1, int x2, int y2, handler_t handler, transition_t transition) { //
Оголошення функції пошуку вглиб
    if (!transition(x1, y1, x2, y2)) { //
Перевірка пар координат переданою функцією перевірки transition
        return 0; // Повернення з функції при непроходженні перевірки
    }
    handler(x2, y2); // Застосування переданого оброблювача до другої пари
координат
    return 1 // Повернення одиниці (як одного пройденного осередку),
сумованої з результатами функції пошуку вглиб по сусіднім (знизу, зверху,
праворуч, ліворуч) осередку по другій парі координат осередкам
    + dfs(x2, y2, x2 + 1, y2, handler, transition)
    + dfs(x2, y2, x2 - 1, y2, handler, transition)
    + dfs(x2, y2, x2, y2 + 1, handler, transition)
    + dfs(x2, y2, x2, y2 - 1, handler, transition);
}

```

```

void mark_space_as_visited() { //
Оголошення функції по чергового обчислення площі області з випадкових коор-
динат, до знаходження області, що має більшість половини площі
    int sum; // Оголошення змінної значення площі
    do { // Цикл, що виконується до виявлення області, що займає більше
половини площі зображення
        reset_matrix(visited); // Очищення матриці відвідувань (для того щоб
зазначеної в при зупинці циклу залишилася лише область, що займає більше
половини площі)
        int x, y; // Оголошення змінних координат
        do { // цикл пошуку випадкової початкової точки
            x = rand() % n; // привласнення x випадкового значення менше n
            y = rand() % m; // привласнення Y випадкового значення менше m
        } while (image[x][y]); // умова циклу вибору випадкової точки
        sum = bfs(x, y); // Надання значення площі області якої належить
випадково обрана точка
        cerr << sum << "\n"; // Виведення площі
        // sum = dfs(-1, -1, x, y, visit_handler, same_color_not_visited_transition);
        } while (sum < n * m / 2 + 1); // Умова циклу на розмір пройденої області
більше половини площі зображення
    }
    int cnt; // Оголошення змінної лічильника
    long long xcord, ycord; // Оголошення змінних суми координат області

void match_handler(int x, int y) { // Оголошення оброблювача зв'язності
    if (image[x][y]) { // Перевірка кольору комірки
        ++cnt; // Збільшення лічильника на 1
        xcord += x; // Додаток x до суми координат x
        ycord += y; // Додаток до суми координат y
    }
}

handler_t match_visit_handler = combine_handlers(match_handler,
visit_handler); // Оголошення поєднаного оброблювача зв'язків та відвідувань
vector<tuple<int, double, double>> matches; //
Оголошення вектора точок ходу

```



```

void fill_match(int x, int y) { //
Оголошення функції заповнення вектору точок входу
    cnt = 0; // Обнулення лічильника
    xcord = 0; // Обнулення координати x
    ycord = 0; // Обнулення координати y
    dfs(-1, -1, x, y, match_visit_handler, not_visited_transition); // Прохід по
області із заданих координат пошуком углиб з обробником зв'язності та
відвідувань, та перевіркою на відвідування
    matches.push_back(make_tuple(cnt, xcord / double(cnt), ycord /
double(cnt))); // Додавання координат входу у вектор
}
void resolve_matches() { // Оголошення пошуку координат входу
for (int i = 0; i < n; ++i) { // Прохід рядками
    for (int j = 0; j < m; ++j) { // Прохід стовпцями
        if (!visited[i][j]) { // Перевірка на відвідування
            fill_match(i, j); //
Обчислення та додавання координат входу у вектор точок входу
        }
    }
}
}
void read_image() { // Оголошення функції зчитування зображення
for (int i = getchar(); i != '\n'; i = getchar()); // Цикл пропуску першого рядка
у файлі
for (int i = 0; i < n; ++i) { // Цикл проходу рядками файлу зображення
    for (int j = 0; j < m; ++j) { // Цикл проходу стовпцями файлу зображення
        image[i][j] = !(getchar() - '0'); // Зчитування осередку зображення
    }
    assert(getchar() == '\n'); // Перехід символу переходу на новий рядок
}
cerr << "reading image done\n"; // Виведення повідомлення про закінчення
зчитування
}

int main() {
    srand(time(NULL)); // генератор рандомних чисел
    freopen("input.txt", "r", stdin); // файл на введення
}

```

```
freopen("output.txt", "w", stdout); // файли нависновок
cin >> m >> n; //зчитування з файлу ширини та висоти
initialize_matrix(image); // ініціалізація матриці зчитуваного зображення
initialize_matrix(visited); // ініціалізація матриці відвідувань
read_image(); // зчитування зображення з файлу до матриці
mark_space_as_visited(); //
cerr << "space marked as visited\n"; //
resolve_matches(); //
for (const auto &i : matches) {
    cout << get<0>(i) << " " << get<1>(i) << " " << get<2>(i) << "\n";
}
}
```

ДОДАТОК 3

**ДЛЯ ПІДРАХУНКУ ВІДСТАНІ МІЖ ВКЛЮЧЕННЯМИ
ВИКОРИСТОВУЄМО НАСТУПНУ ПРОГРАММУ
ВИКОРИСТОВУЮЧИ ДАННІ 'OUTPUT.TXT' З МИНУЛОЇ
ПРОГРАМИ**

```

import math // підключення бібліотеки
def radius(p): // оголошення функції радіус
    return (p / math.pi)**0.5 // підрахунок радіусу з формули площі кола
def distance(a, b): // оголошення функції відстані
    return ((a[1] - b[1])**2 + (a[2] - b[2])**2)**0.5 - radius(a[0]) - radius(b[0])
// підрахунок відстані через формулу відстані між двома точками
with open('output.txt') as file: // відкриття файлу на підрахунок
    content = [i.split() for i in file.read().split('\n')] // запис значень із файлу до
контенту через лічильник
    content = list(filter(lambda i: len(i) == 3, content))
// фільтр за розміром включень
    for i in range(len(content)): // йдемо від 0 до розміру масиву
        line = content[i] // записуємо значення масиву з індексом i
у тимчасову змінну line
        content[i] = (int(line[0]), float(line[1]), float(line[2])) //
перетворюємо складові поточної трійки чисел у відповідні типи
    with open('result.txt', 'w') as file: // відкриваємо файл result.txt для запису
        for i in range(len(content)): // йдемо від 0 до розміру масиву
            for j in range(len(content)): // йдемо від 0 до розміру масиву
                if i >= j:
                    continue // пропускаємо ітерацію,
якщо індекс i рівний або менше j
                // записуємо у файл відстань між точками відповідними елементам масиву
з індексами i та j
                file.write(f'({content[i][1]}, {content[i][2]}) -> ({content[j][1]},
{content[j][2]}) = {distance(content[i], content[j])}\n')

```

ДОДАТОК 4

**ДЛЯ ПІДРАХУНКУ КІЛЬКОСТІ ВКЛЮЧЕНЬ У ВКАЗАНИХ
ІНТЕРВАЛАХ РОЗМІРІВ ВКЛЮЧЕНЬ**

`print('enterinputfilename')` /вивести на екран введіть ім'я файлу для зчитування

`input_file = input()` /введення назви файлу на введення

`print('enteroutputfilename')` //вивести на екран введіть ім'я файлу виведення результатів

`output_file = input()` / введення значень для назви файлу на виведення

`print('entercoef')` / виведення ввести коефіцієнт

`coef = float(input())` /считування коефіцієнт

`file1 = open(input_file, 'r')` / считуванняфайлу

`scale = []`

`for line in file1:`

`scale.append(float(line.split(' ')[0])*coef)` /перемноження значень а також считування(перший рядок перетворює у масив рядків и считує лише перший з них)

`group1 = 0` / створення групи 1

`group2 = 0` / створення групи 2

`group3 = 0` / створення групи 3

`group4 = 0` / створеннягрупи 4

`for s in scale:`

`if(s<=0.000003): group1+=1` /значеннядлягрупи 1

`if(s>0.000003 and s<=0.000005): group2+=1` / значення для групи 2

`if(s>0.000005 and s<=0.000008): group3+=1` / значення для групи 3

`if(s>0.000008): group4+=1` / значення для групи 4

```
file2 = open(output_file, 'a') /створення файлу для запису
file2.write('from 0 to 0.3: ' + str(group1) + '\nfrom 0.3 to 0.5: ' + str(group2))
/запис у файл
file2.write('\nfrom 0.5 to 0.8: ' + str(group3) + '\nfrom 0.8: ' + str(group4)) /
запис у файл
file1.close() /
file2.close() /
```