

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломної роботи (проекту)

магістр

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему: **Автоматизований експрес-метод оцінювання ударної в'язкості епоксикомпозитів за кількісним аналізом морфології поверхні руйнування лабораторних зразків**

Виконали: студенти

6 курсу групи КАм-61

спеціальності

151 – «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

(шифр і назва напрямку підготовки, спеціальності)

**Присташ Андрій Степанович,
Сторожук Юрій Вадимович**

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

(підпис)

проф. Марущак П.О.

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

(підпис)

ст. викл. Козбур І.Р.

(прізвище та ініціали)

Рецензент

(підпис)

доц. каф. КТ

доц. Золотий Р.З.

(прізвище та ініціали)

м. Тернопіль – 2019

Анотація

Присташ Андрій Степанович, Сторожук Юрій Вадимович Автоматизований експрес-метод оцінювання ударної в'язкості епоксикомпозитів за кількісним аналізом морфології поверхні руйнування лабораторних зразків, Тернопіль, ТНТУ, 2019.

Розроблено низку заходів та технічних пристроїв для автоматизації механічних та оптико-цифрових випробувань з метою зменшення трудомісткості та вартості досліджень ударної в'язкості епоксикомпозитів, підвищення точності й достовірності експериментальних результатів, покращення умов праці, швидкої зміни програми випробувань та зменшення часу експерименту.

Фрактальна розмірність характеризує структуру та розвинутість поверхні руйнування. При «чистому» ФР невелика, із збільшенням шорсткості поверхні вона зростає. Енергоємність руйнування епоксикомпозитів пов'язана з фрактальною розмірністю поверхні.

Розроблені автоматизовані методи є корисними для проектування полімеркомпозитних захисних покриттів із самоорганізованою структурою на основі урахування закономірностей фізико-хімічних процесів при формування епоксикомпозитних матеріалів.

Розглянуто підхід, який дозволяє створювати проблемно-орієнтовані та спеціалізовані експертні системи, налаштовані на певну аналізовану ділянку контрольованого об'єкту. Оцінено економічну ефективність проекту та запропоновано заходи з охорони праці, безпеки життєдіяльності та охорони довкілля.

ЗМІСТ

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

- 1.1. Взаємозв'язок між ударною вязкістю та структурою композитних матеріалів 12
- 1.2. Методи розрахунку фрактальної розмірності та їх особливості 14

2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

- 2.1. Характеристика технології та алгоритми обчислення ФР 23
- 2.2. Використання аналітичних систем для кількісного аналізу зображень 29
- 2.3. Параметр ФР за дослідження епоксидних композитів 37

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА.

- 3.1. Аналіз вихідних даних на проектування, базових властивостей ФР 40
- 3.2. Обґрунтування вибору методів обчислення ФР 53
- 3.3. Обґрунтування вибору, опис та розрахунок технічних засобів автоматизації 55

4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

- 4.1. Характеристика об'єкту або предмету дослідження 57
- 4.2. Точність обчислення параметрів та принципи її забезпечення
- 4.3. Визначення ФР ділянок вязкого руйнування 74
- 4.4. Нові закономірності ударного руйнування 76

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

- 5.1. Обґрунтування вибору програмного забезпечення для розрахунків ФР 78
- 5.2. Обґрунтування вибору методу сіток 82

6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ 85

7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ 95

8. ЕКОЛОГІЯ	99
ВИСНОВКИ	105
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	106

ВСТУП

Епоксикомпозитні покриття використовують в багатьох областях економіки. Проте, вони дуже вразливі до короткочасних екстремальних динамічних навантажень, які є наслідком ударного навантаження транспортного засобу, випадкових вибухів, ударів літака, землетрусів тощо. Характеристика руйнування (включаючи оцінку та ступінь ураження конкретних елементів) має вирішальне значення для їх ефективного захисту. Коли епоксикомпозит піддається ударному навантаженню, він зазнає різних фаз пошкодження. Ці пошкодження можуть бути внутрішніми, без видимих ознак на поверхні зразка; або зовнішніми, з утворенням макроскопічних тріщин.

Дослідження механізмів реагування епоксикомпозитів, проведені відомими вченими, зокрема: Стухляком П.Д., Букетовим А.В., Сапроновим О.О., Браїлом М.В., Золотим Р.З., Тотоськом О.В. та ін. за різних типів навантажень показали, що поведінка епоксикомпозитів на макромасштабі визначається, головним чином, мікроструктурними неоднорідностями. Неоднорідність спричиняє не тільки неправильний розподіл внутрішніх напружень, а й початкові локальні дефекти, такі як порожнини та мікротріщини. Під час навантаження ці початкові пошкодження можуть зростати та поширюватися, і, таким чином, процес руйнування матеріалу ґрунтується на старті та поширенні тріщин. Тип росту тріщин впливає на споживання енергії, а відповідно і на стан поверхні зламу, утвореного під час процесу руйнування.

Мікророзтріскування, об'єднання тріщин, їх гілкування і блокування є основними механізмами руйнування епоксикомпозитів. Вони відіграють визначальну роль у формуванні структури поверхні руйнування. Поверхня руйнування та текстура епоксикомпозитів забезпечують одержання закономірностей поширення тріщин, кількісних показників їх стану.

Загалом, прийнято, що кілька параметрів визначають шорсткість і текстуру поверхні руйнування епоксикомпозиту.

Починаючи від праці Б. Мандельброта, теорія фрактальної геометрії знайшла широке застосування у матеріалознавстві, хімії, фізиці. Вона забезпечує вивчення взаємозв'язку між механічними властивостями та морфологією поверхні руйнування. Відомі праці у яких встановлено кореляційний зв'язок між фрактальною розмірністю та міцністю на статичного розтягу кородованих сталевих прутів.

Огляд літератури свідчить про те, що всі проведені до цього часу дослідження не охоплювали кількісного аналізу ФР поверхні руйнування матеріалів, зокрема епоксикомпозитів. Відомі праці В. Кокзака та О. Попадюк щодо оцінювання фрактальності зламів, проте співставлення фрактальної розмірності з енергоємністю руйнування в їх працях відсутні. Основна мета цього дослідження - визначити фрактальний характер та закономірності руйнування епоксикомпозитів, що мають різні міжфазні співвідношення та різні механічні характеристики, використовуючи цифровий аналіз зображення та безконтактний лазерний профілометр та встановити, чи існує кореляція між шорсткість фрактальної поверхні і ударною в'язкістю руйнування.

Цей дипломний проект спрямовано на поглиблення оптико-цифрових методів оцінювання властивостей матеріалів, вдосконалення методологічних аспектів фрактального аналізу. Для проведення фрактального аналізу використано морфологічні знімки поверхні епоксикомпозитів.

Автори проекту висловлюють глибоку подяку доц. Сапронову О.О. за надані фотозображення епоксикомпозитів та дані механічних випробувань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Взаємозв'язок між ударною вязкістю та структурою композитних матеріалів

У статті [1] визначено фрактальні властивості (ФВ) та текстуру поверхонь руйнування та досліджено їх вплив на закономірності руйнування різних типів бетону, що відрізняються фазовим складом. Бетони, виготовлені з граніту та вапнякової суміші «Холдстоун», випробувано на удар за швидкісного динамічного навантаження; а профілі руйнування були оцифровані та проаналізовані за допомогою аналізу зображень та лазерної профілометрії. Зроблено висновок, що відносно пориста і слабка міжфазна зона в бетоні з гранітними частинками є причиною його вищої енергоємності руйнування, і, отже, потребує більше енергії на коалесценцію тріщин, а поверхня руйнування має вищу шорсткість та фрактальну розмірність, рис. 1.1.

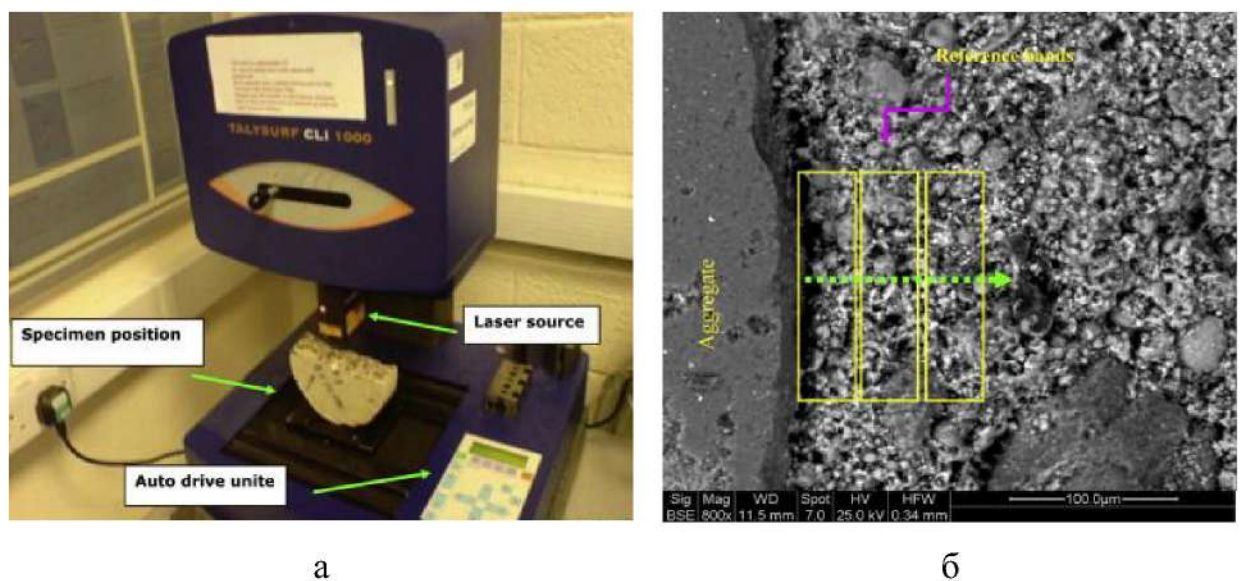


Рис. 1.1. Схема зйомки поверхні – а та типове зображення для оцінювання пористості в на межі фаз (в інтерфейсній зоні) – б [1]

Армування макрофібрами (макроволокнами) є ефективним способом покращення зовнішньої міцності бетону. Зі зростаючим інтересом

громадськості до широкомасштабного використання залізобетонних конструкцій (FRC), необхідність розуміння та оцінка механізму зміцнення мікрОВОлокнами зростає. У дослідженні [2] аналізували вплив кількості макрополіпропіленових волокон, сталевих дрітків, або їх суміші на закономірності формування топографії зламу будівельних матеріалів як композитних систем, рис. 1.2.

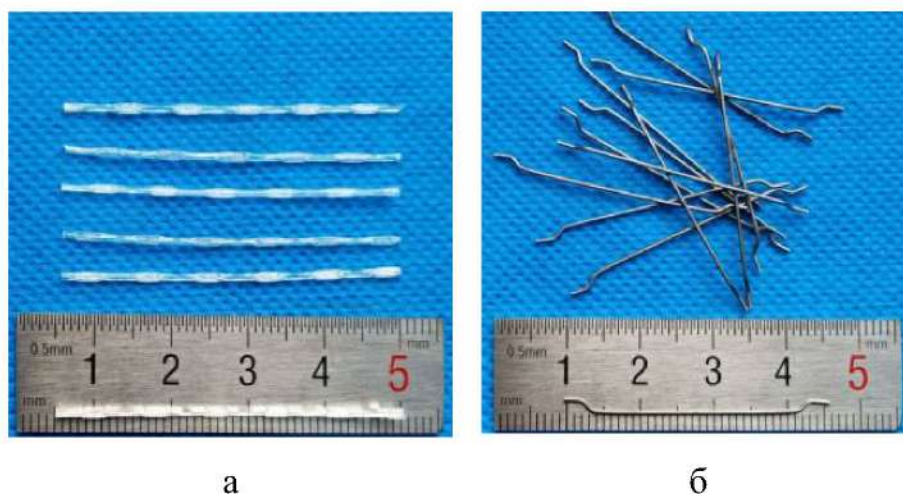


Рис. 1.2. Геометрія волокон: поліпропіленові (а) та сталеві (б) [2]

Виконано топографічний аналіз поверхні руйнування за допомогою виготовленого на замовлення 3-D обладнання для лазерного сканування, а перевірена поверхня була досліджена на триточковий згин, рис. 1.3.

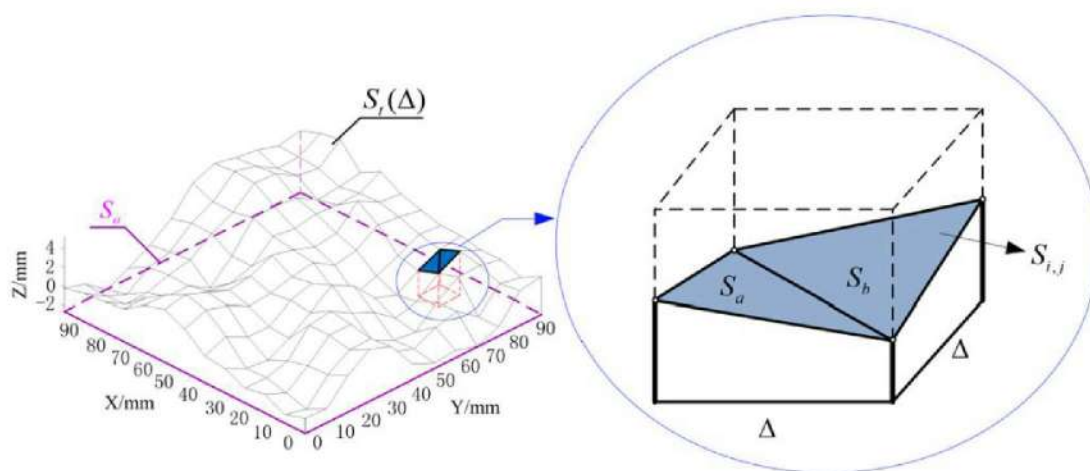
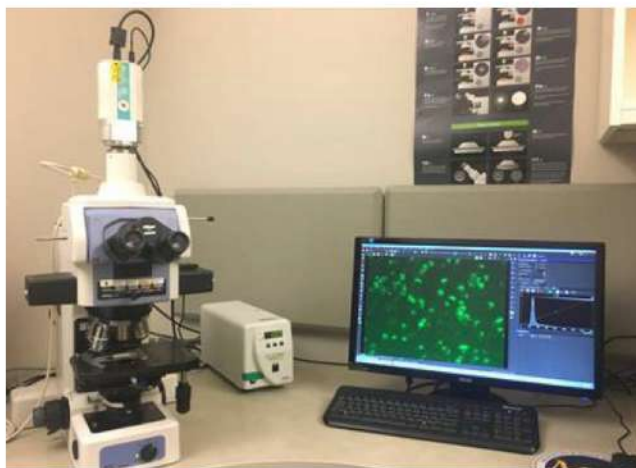


Рис. 1.3. Схематичне представлення поверхні руйнування зразків бетону

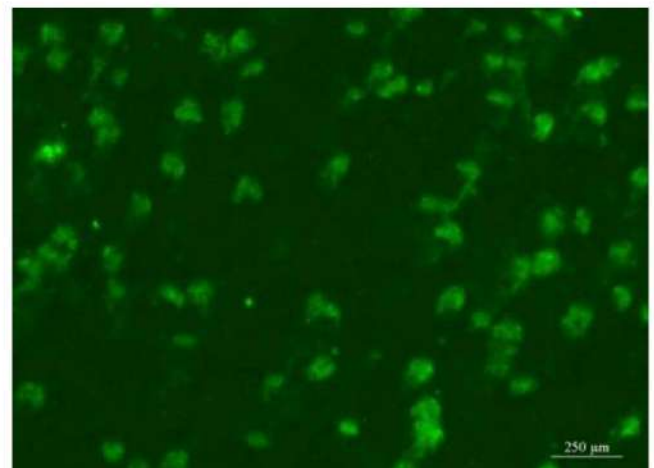
1.2. Методи розрахунку фрактальної розмірності та їх особливості

Результати топографічного аналізу кількісно оцінювали за параметрами номера шорсткості (RN), ФР (D), стандартного відхилення розподілу висоти відміток поверхні руйнування. Збільшення міцності бетону можна одержати за зростання рельєфу поверхні руйнування досліджених зразків.

Цікаві результати отримано у праці [3], конструйований цементний композит (ЕСС) - це вдосконалений будівельний матеріал, що має можливість деформуватися при розтязі, проте йому властиве множинне розтріскування. Як відомо, міцність на розтяг ЕСС чутлива до кількості та розміру використаного піску. Більшість досліджень на ЕСС проводили з дрібним кремнеземним піском, водночас більш грубий пісок використано лише у окремих працях. Однак вплив морфологічних параметрів піску на механічні показники ЕСС ще не досліджено, що є основним. Морфологічні параметри (включаючи округлість і сферичність частинок) піску визначали за допомогою аналізу зображень та комп'ютерних алгоритмів, рис. 1.4.



a



b

Рис. 1.4. Налаштування флуоресцентного мікроскопу (a) та (б) зображення одиничної площі, зняте з перерізу ЕСС [3]

Виявлено, що зниження округлості та сферичності частинок піску призводило до підвищення міцності на стиск, граничної міцності на розрив та деформівних властивостей. Габро-пісок з найнижчою круглості та сферичності серед чотирьох досліджених природних типів піску зумовив найкращі механічні властивості ЕСС. Цей природний пісок може слугувати ефективною альтернативою типовому дрібнодисперсному кварцовому піску, який використовується в ЕСС зі зниженими витратами матеріалів та впливом на навколишнє середовище.

У праці [4] оцінено ФР зламів у ламінованому вуглецевому / епоксидному композиційному матеріалі шляхом проведення випробувань подвійного консольного пучка (DCB) та співставлення фрактальних значень з критичними критичних (в околі надрізу), або у локальних зонах (на контрольних ділянках вздовж поверхні) з даними в'язкості руйнування. Звичайний оптичний мікроскоп дозволив отримувати впорядковані зображення карт висоти за методом розширеної глибини поля, шляхом кількісного дослідження морфології поверхні руйнування, рис. 1.5.

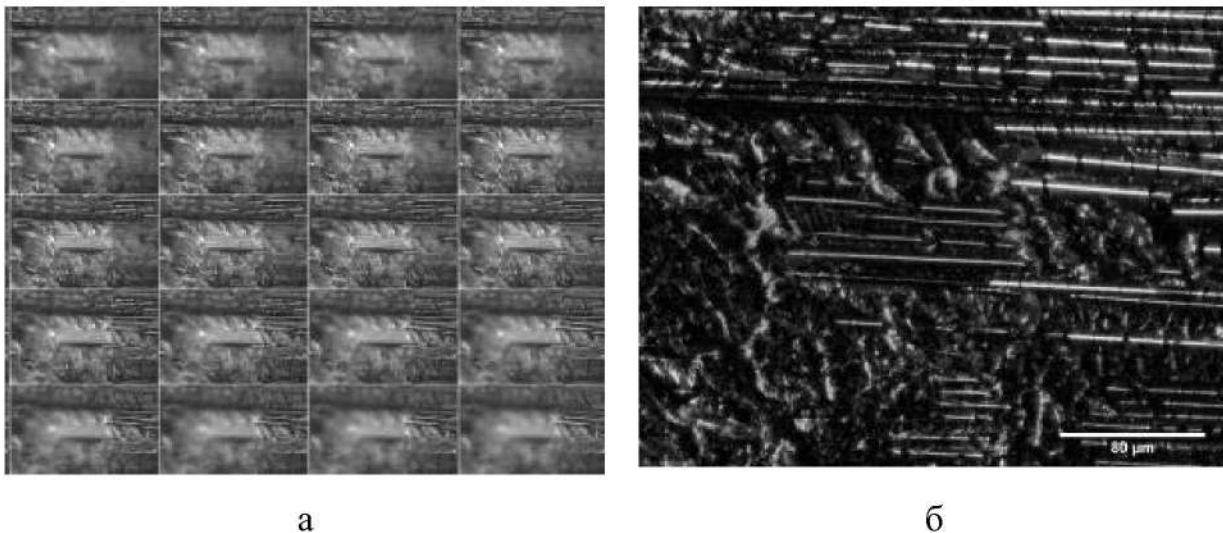


Рис. 1.5. Показовий приклад розширеної глибини різкості: (а) упорядкований стек зображень (б) [4]

Також запропоновано новий метод визначення порогового значення між макро- та мікромеханізмами руйнування, для "змішаної фрактальної поведінки", що дозволяє порівнювати монофракційну поведінку із "структурною" (мікромасштаб або низька роздільна здатність) та "текстурною" (макромасштаб або висока роздільна здатність) змішані фрактальні компоненти. Було виявлено лінійну кореляцію між в'язкістю руйнування за модою I та "структурним" фрактальним розміром, що описує фрактальну поведінку в мікромасштабі. Отже, формування поверхні руйнування у вуглецевих / епоксидних композитах сильно пов'язане з локальними особливостями мікроструктури.

Фрактальні дослідження широко застосовують у виготовленні протезів зубів, зокрема [5, 6] за допомогою алгоритму написаного у програмі MathCAD передавали дані зі сканування атомних силових мікроскопів на програмне забезпечення FRACTALS Джона Руса, рис. 1.6.

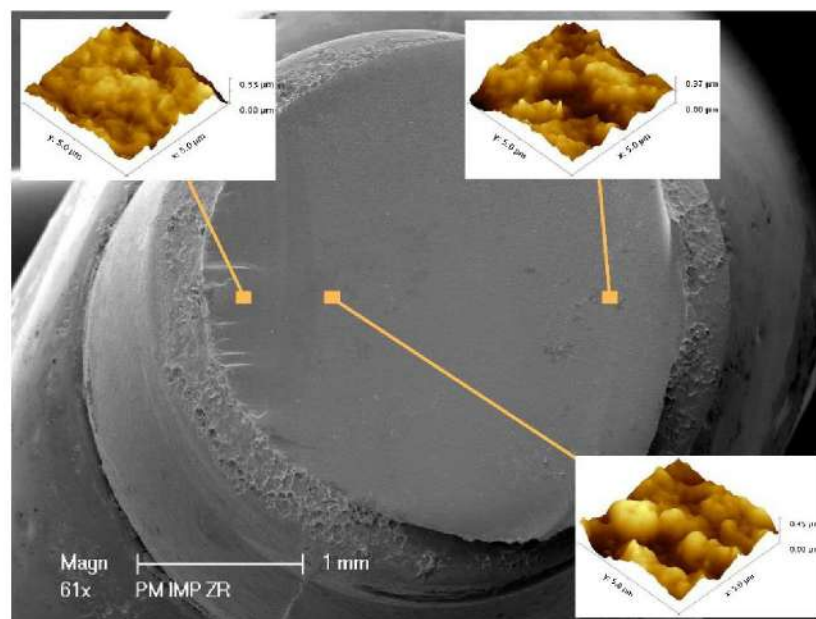


Рис. 1.6. Поверхня руйнування зубного імплантату Y-TZP (Axis Biodental), яка клінічно вийшла з ладу. Атомну силову мікроскопію використано для вимірювання ФР на трьох різних відстанях вздовж шляху поширення тріщини. Напрямок розповсюдження тріщини був зліва направо [5]

Це програмне забезпечення містить шість алгоритмів аналізу поверхонь, тому було проведено експеримент, щоб визначити, який алгоритм забезпечив найбільшу точність значень фрактальної розмірності (D^*) та калібрувати цього алгоритму на поверхнях, генерованих із відомими значеннями D . Зразки аналізували за допомогою обраного алгоритму. Розглядали кремнеземне скло, розбите в деіонізованій воді та порівнювали з номінально однаковими зразками, зруйнованими в слині, рис. 1.6. Полівінісілоксан було застосовано для емітації руйнування руйнування поверхонь Y-TZP. Також були обстежені клінічно невдалі зубні імплантати Y-TZP. Окрім того, міцність на руйнування та значення D^* було визначено для чотирьох керамічних матеріалів (нітриду кремнію, силікатного скла, Y-TZP та склокерамічного дисилікату літію).

У роботі [7] повідомляється про моно- та мультифрактальний підхід щодо кількісного визначення нерівностей на тонких плівках Al, нанесених на скляні підкладки за різної температури основи (T). Встановлено взаємозв'язок фрактальних характеристик та механічних властивостей нерівностей. Найменша щільність і розміри рельєфних утворень були отримані за 95°C , а найвищі при -65°C . Встановлено взаємозв'язок потужності (з фрактальним визначенням (D) як параметром потужності) периметром обробленої ділянки і областями окремих нерівностей із значно більшим коефіцієнтом регресії ($R^2 \approx 0,9$) для всіх температур, рис. 1.7.

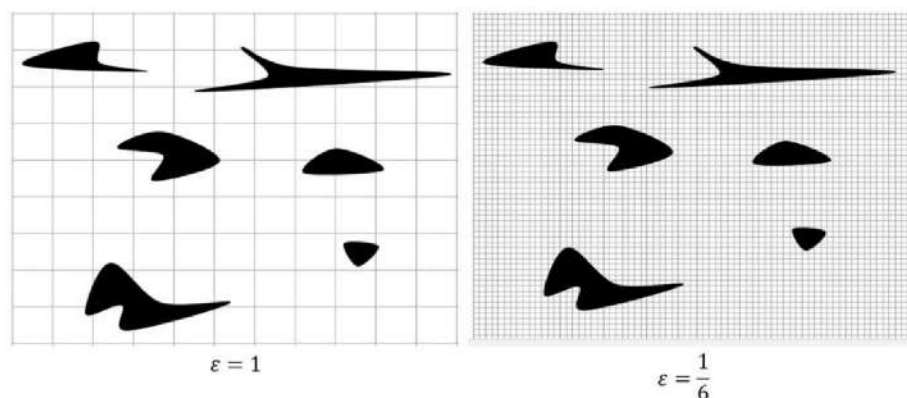


Рис. 1.7. Принципова схема методу сіток, де ліве зображення показує сітки однієї одиниці, а праворуч - сітки 1/6 одиниці. Чим менший розмір сітки, тим більшою є кількість клітинок і точніше значення ФР. Оптимальну кількість клітинок $N(\varepsilon)$ слід визначити з метою скорочення часу обчислень [8]

Фрактальне дослідження сегментованих мікронерівностей показало, що ці структури мають мультифрактальні характеристики. Лінійні профілі зображень областей нерівності поверхні виявили неоднорідні синусоїди, що додатково підтверджує фрактальну природу цих структур. Механізм деформації горбів при нормальному наноіндентуванні описано шляхом оцінки форми виступу на кривих на кривих наноіндентування.

Відомо значну кількість методів обчислення ФР зображень, наприклад метод сіток. Методи обчислення ФР, лакуарності та суколярності, наведені у [7, 8], базуються саме на ньому. У цій роботі вперше запропоновано алгоритм підрахунку методом сіток, шляхом обчислення фрактальних розмірів стандартних самоподібних 2D і 3D фрактальних структур, рис. 1.8.

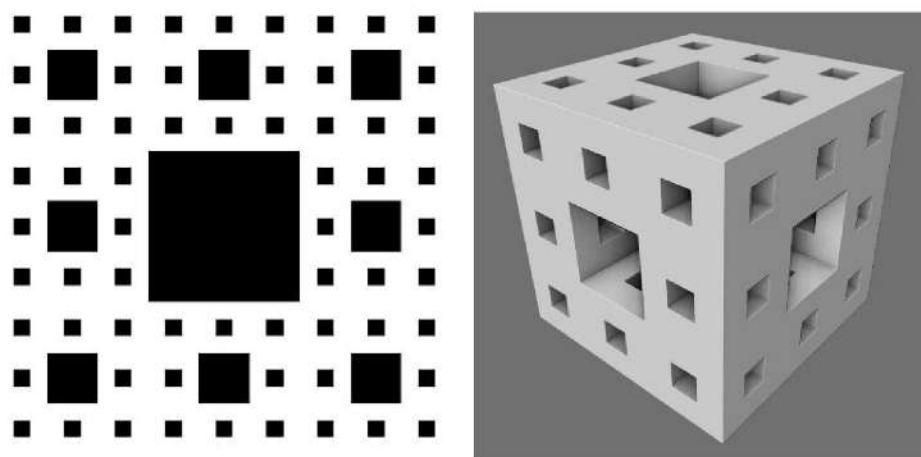


Рис. 1.8. Представлення килима Серпінського третього порядку (зліва) та Менгера Губки другого порядку (справа) [7]

На рис. 1.8 показаний килим Серпінського третього порядку та Менгер Губка другого порядку. Результати нашої програми були ідентичними

ідеальним значенням 1,8928... та 2,7268... для фрактальних розмірів білої фрактальної фази килима та сірої фрактальної фази губки відповідно. Це наочно демонструє достовірність запропонованого алгоритму та програми обчислення ФР.

Ширина мультифрактального спектру ($\Delta\alpha$) та відношення узагальненого ФР D_{min} до D_{max} (D_{min} / D_{max}) демонструють чудову лінійну негативну кореляцію із схильністю до окрихчення. Детально було проаналізовано внутрішню причину. Важливо зазначити, що є дві лінійні кореляції між фрактальними параметрами та наводнюванням сталей, і вони дають інструмент оцінювання властивостей сталей на основі морфологічних зображень поверхонь руйнування без багатоступеневих експериментів і можуть бути застосовані при аналізі відмови на реальних технологічних об'єктах, рис. 1.9.

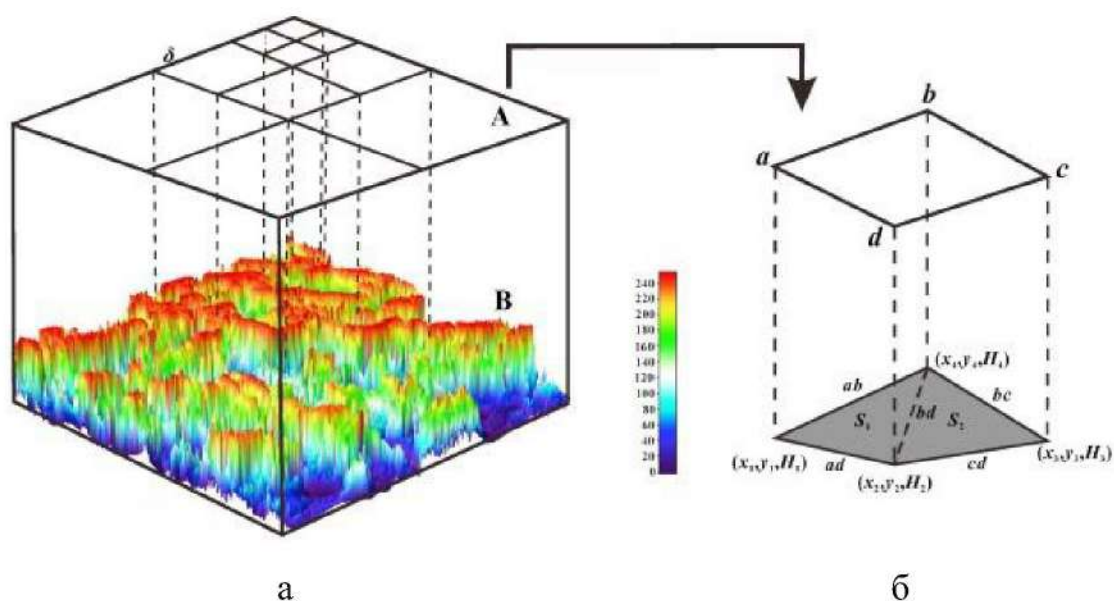


Рис. 1.9. Застосування методу сіток для оцінювання механізмів руйнування наводненої сталі [9].

Відомі приклади застосування фрактальної теорії в триботехніці, зокрема було оцінено фрактальну поведінку ковзаючих поверхонь Поліаміду 66 армованого скловолокном на 30%. Трибологічні випробування

проводили за різних умов, і фрактальні значення співвідносили з трибологічними параметрами та еволюцією морфологічних особливостей поверхні. Карти рельєфу будували із зображень, отриманих на звичайному оптичному мікроскопі, рис. 1.11.

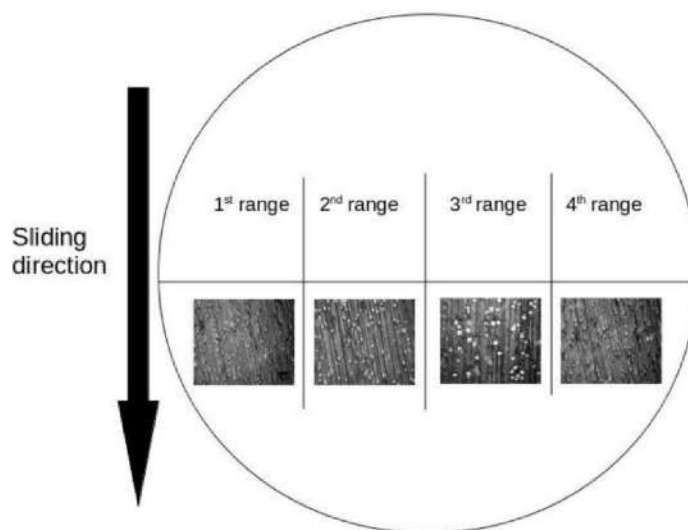


Рис. 1.10. Фотомонтаж, що описує морфологічну еволюцію вздовж діаметру зразка [11]

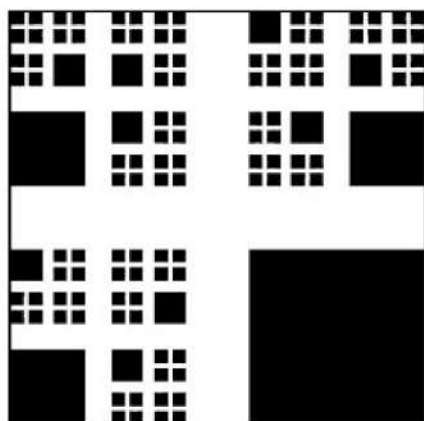
Розширений метод глибинної різкості дозволив упорядкувати глибини зображень для кількісного дослідження поведінки поверхонь. Запропоновано надійний метод встановлення порогу між мікро-шкалою та макро-шкалою для мульти-фрактальної поведінки, що дозволяє порівнювати монофракційну поведінку із "структурною" (мікро-шкалою) та "текстурною" (макро-шкала) змішані фрактальні компоненти. Було встановлено, що дані ФР залежать від трибологічних умов та положення вздовж ковзних поверхонь.

Методи аналізу текстури використовують у на різних етапах обробки зображень, таких як сегментація, класифікація та розпізнавання, аналіз форми. Продуктивність алгоритмів комп'ютерного зору та обробки зображень залежить від моделей візуальної текстури. Однак визначити це важко. Фрактальний розмір (FD) допомагає виміряти рівень шорсткості, присутній на зображенні. У літературі є значна кількість роботи з

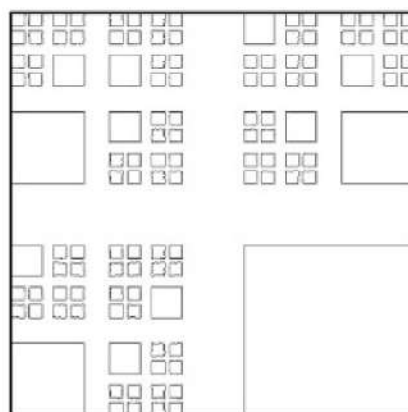
вимірювання ФР. Диференціальний підрахунок комірок (DBC) – є одним з успішних методів, який використовують в аналізі текстури зображень, тому що його просто і легко зрозуміти. DBC кілька разів модифікували для отримання кращого значення FD. Однак більшість найсучасніших методів мають недоліки «переобчислень» та «недообчислень» комірок. Ця робота розвиває метод DBC, а використаний алгоритм який використовує нову формулу для підрахунку комірок уздовж напрямку поширення тріщини.

У [11] зосередили увагу на співвідношеннях ФР, міцності на стиск та проникність бетону, що включає пил кремнію.

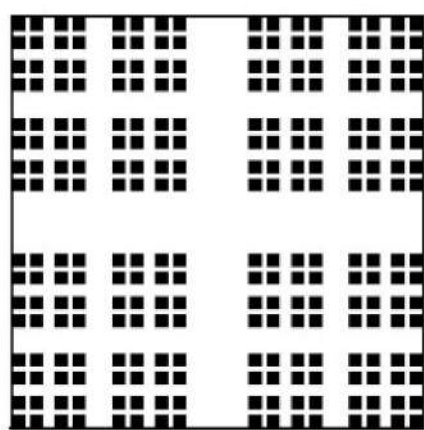
Відомі приклади застосування ФР для оцінювання множинного розтріскування ґрунтів, рис. 1.12.



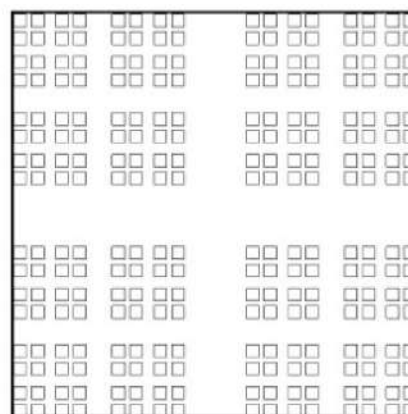
а



б



в



г

Рис. 1.12. Шаблони, розроблені для перевірки ФР множинного розтріскування ($D2$): (а) випадкові з $D = 1,28$, (b) межі випадкових з $D = 1,28$, (с) квадрат з $D = 1,62$, і (d) межі квадрата з $D = 1,62$.

Швидке транспортування води та розчинених у ній речовин через тріщини може призвести до вимивання поживних речовин, а також забруднення ґрунтових та поверхневих вод. Завданнями дослідження [11] було визначення (1) площі тріщин поверхні ґрунту, (2) ФР країв тріщини ($D1$) та (3) масового фрактального розміру ($D2$) та лакуарності ґрунтових тріщин. Виявлено, що методи аналізу фотографічних зображень та фрактальний аналіз розрізняють відмінності в зоні тріщин та шаблонах і можуть бути корисними для опису розтріскування ґрунтів.

Перспективним напрямом для розвитку фрактального аналізу є застосування глибоких нейронних мереж. Останнім часом глибокі звивисті нейронні мережі (CNN) досягли прекрасного підвищення продуктивності в задачах Super Image Resolution (SISR). Однак більшості існуючих моделей на основі CNN все ще важко вивчити та повною мірою використовувати адекватні ієрархічні особливості, що має вирішальне значення для ідеального відновлення як високочастотної, так і низькочастотної інформації. Як правило, у багатьох мережах, як правило, входять численні параметри, спрямовані на покращення їх навчальних можливостей, що вимагає більшого обсягу зберігання даних і менш застосовно до мобільних систем. Експериментальні результати показують, що DFRN має можливість вивчати різні ієрархічні особливості та перевершує інші найсучасніші методи для SISR шляхом реконструкції зображень з низькою роздільною здатністю (LR) на зображення HR та швидко та точно.

2. ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1. Характеристика технології та алгоритми обчислення ФР

У відповідності до концепції узагальненій у статті [doi:10.3390/ma5050922] енергія що підводиться до зразка під час удару розподіляється наступним чином, рис. 2.1. Шорсткість сформованої поверхні руйнування відіграє головну роль у оцінюванні поглинання енергії руйнування.

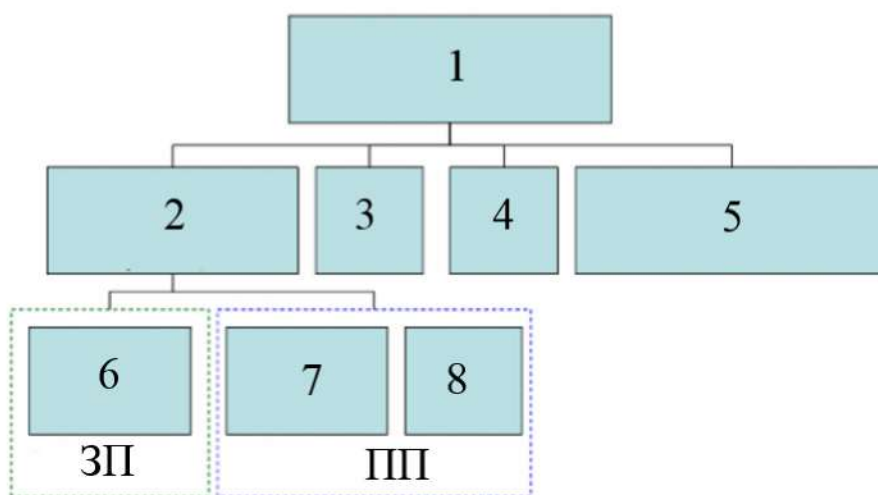


Рис. 2.1. Перерозподіл енергії підведеної до зразка під час удару (1): 2 - енергія «поглинута» матеріалом зразка; 3 - витрачена на створення звуку; 4 - на тепло; 5 - кінетична енергія «плаваючих часток»; 6 - енергія пружного деформування; 7 - енергія непружного деформування; 8 - енергія руйнування.

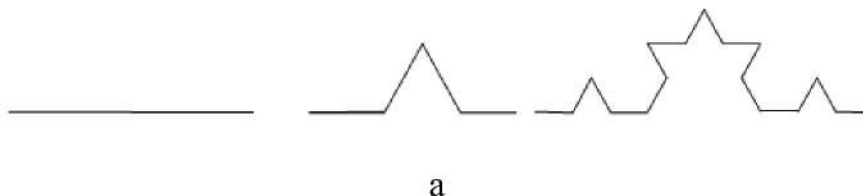
Починаючи з перших праць Б. Мальденброта [1], видано значну кількість праць про статистичні характеристики шорсткості поверхонь руйнування. Зараз очевидно, що топографію зламів можна охарактеризувати як сформовану внаслідок самоорганізації матеріалу, що дозволяє застосувати до її опису концепцію фрактальної геометрії.

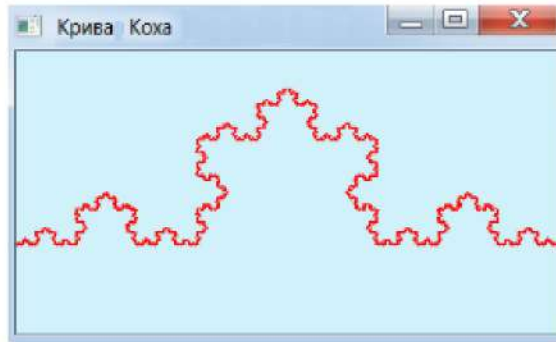
Після зародження тріщини та етапі її поширення гілкування фронту залежить від підведеної до системи енергії та властивостей матеріалу, що зумовлює

фрактальну самоподібність поверхні руйнування. Отже автоматизоване визначення ФР поверхні руйнування дозволяє є одним зі шляхів порівняння енергоємності поширення тріщини.

Гріффітс стверджує, що крихке руйнування виникає тоді, коли енергія, що вивільняється є більшою за енергію руйнування, необхідну для створення нових поверхонь руйнування. Отже, більш розвинута геометрія поверхні є свідченням того, що руйнування було більш енергоємним, про більшу абсорбцію енергії руйнування під час поширення тріщини.

Одже, однією з характеристик поверхні зламу композитних матеріалів поряд крім стандартних параметрів шорсткості, є фрактальна розмірність (ФР). Є значна кількість методів обчислення ФР за співвідношенням "периметр-площа". Розмірність фрактального об'єкта визначається на основі поняття фракталу. Фрактал - це множина, розмірність Хаусдорфа - Безиковича якої є більшою топологічної розмірності. Фрактал має дробову розмірність. У двомірному випадку фрактальну криву отримують за допомогою певної ламаної лінії (або поверхні в тривимірному випадку), званої генератором. За один крок алгоритму кожен з відрізків, що складають ламану лінію, замінюється на ламану – генератор з відповідним масштабуванням. За результатами нескінченного повторення цієї процедури одержують геометричний фрактал. Розглянемо один з таких фрактальних об'єктів - триадну криву Коха. Побудова кривої починається з відрізка одиничної довжини (рис. 2.2) - це 0-е покоління кривої.





б

Рис. 2.2. Побудови кривої Коха: фізична процедура – а та її реалізація – б

Далі кожну ланку (в нулевому поколінні один відрізок) заміняли на утворюючий елемент, що значався як $n=1$. Наслідком такої заміни є наступне покоління кривої Коха. В 1-му поколінні – це крива з чотирьох прямолінійних ланок.

Одержання 3-го покоління відбувається за подібним принципом: кожну ланку міняють на зменшений твірний елемент. Отже, для одержання кожного наступного покоління всі ланки попереднього покоління слід замінити зменшеним твірним елементом.

Кривая Коха є структурою, що містить самоподібні частини, тобто вони, в певному сенсі подібні цілому. Такі геометричні об'єкти належать до самоподібних об'єктів. Отже, в широкому діапазоні масштабів топографічні особливості і повторення об'єкту є одними і тими ж самими.

Так, для кривої Коха, обравши фрагмент, рівний $1/3$ відрізка лінії, довжиною, рівною одиниці, і збільшивши його в 3 рази можна одержати початковий відрізок, що дорівнює одиниці. Такі об'єкти мають скейлінг, або іншими словами їм властивий масштаб вимірювань.

На рис. 2.3 є три покоління кривої. Якщо взяти за основу не пряму, а трикутник і застосувати той самий алгоритм для кожної зі сторін, то одержимо фрактал, який називають називаємий сніжинкою (островом) Коха (рис. 2.3).

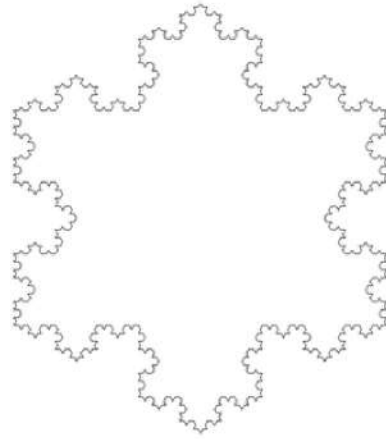
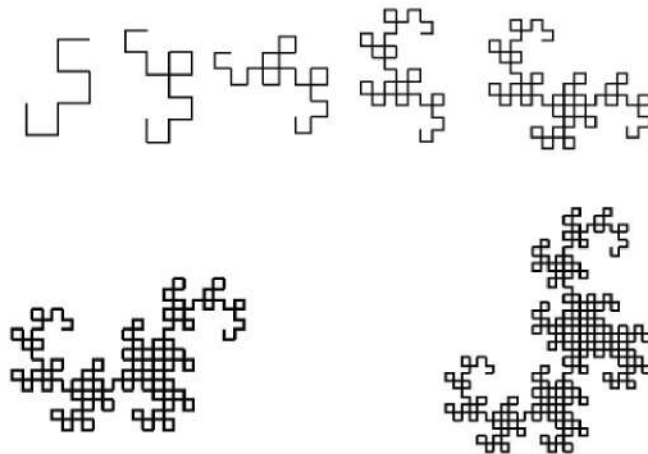


Рис. 2.3. "Сніжинка" Коха

При побудові наступних поколінь дотримуються правила: саму першу рамку зліва замінюють на утворюючий елемент так, щоб середина ланки змещувалась вліво від напрямку руху, а за заміни наступних ланок напрям зміщення середин відрізків повинен чергуватися. На рис. 2.3 подано перші покоління кривої, поуюдованої за описаним принципом.

Граничну фрактальну криву (за $n \rightarrow \infty$) називають "драконом" Хартера-Хейтуея (рис. 2.4). На рис. 2.5 показано "килим" польського математика Серпінського.



```

procedure Dragon(x1,y1,x2,y2,Depth:Longint;canv:TCanvas);
procedure Paint(x1,y1,x2,y2,k:Longint);
var tx,ty:Longint;
begin
  if k=0 then
  begin
    canv.MoveTo(x1,y1);
    canv.LineTo(x2,y2);
    Exit;
  end;
  tx:=(x1+x2) div 2+(y2-y1) div 2;
  ty:=(y1+y2) div 2-(x2-x1) div 2;
  Paint(x2,y2,tx,ty,k-1);
  Paint(x1,y1,tx,ty,k-1);
end;
begin
  Paint(x1,y1,x2,y2,Depth);
end;

```

Рис. 2.4. Процедура побудови "дракона" Хартера-Хейтуея: візуальне зображення – а та алгоритм написаний на мові delphi – б.

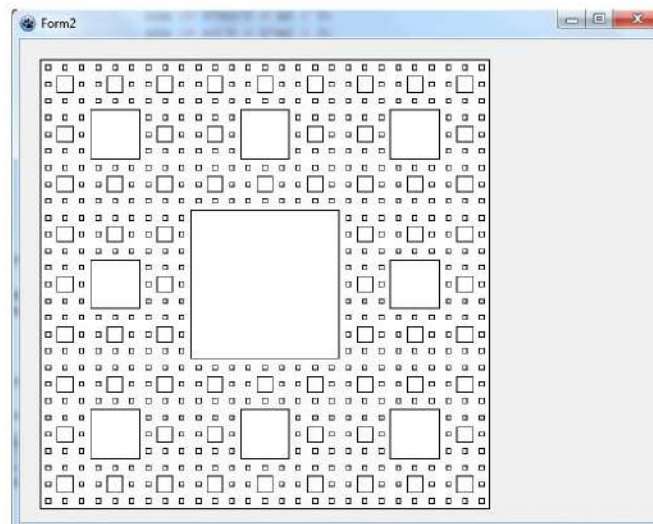


Рис. 2.5. Побудова "килима" Серпінського

Килим Серпінського є двувимірним аналогом канторівської безмежності виключених середніх третин. Будується килим Серпінського наступним чином: спочатку беруть квадрат зі стороною рівною одиниці, потім кожен бік квадрату ділиться на три рівні частини, а весь квадрат, відповідно, на дев'ять однакових комірок з однаковою стороною. З отриманої фігури вирізають центральний квадрат. Потім подібній процедурі піддають кожен з 8 комірок і т. ін. Код програми для побудови килима Серпінського:

```

{$mode objfpc}{$H+}

interface

uses
  Classes, SysUtils, FileUtil, Forms, Controls, Graphics, Dialogs, StdCtrls,
  ExtCtrls;

type
  { TForm1 }

  TForm1 = class(TForm)
    Button1: TButton;
    PaintBox1: TPaintBox;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
  private
    { private declarations }
  public
    { public declarations }
  end;

var
  Form1: TForm1;
  x1, y1, x2, y2, x3, y3: Double;

implementation

{$R *.lfm}

{ TForm1 }

```

продовження:

```

procedure TForm1.Serp(x1, y1, x2, y2: Real; n: Integer);
var
  x1n, y1n, x2n, y2n: Real;

begin
  if n > 0 then
  begin
    x1n := 2*x1/3 + x2 / 3;
    x2n := x1/3 + 2*x2 / 3;
    y1n := 2*y1/3 + y2 / 3;
    y2n := y1/3+2*y2 / 3;
    PaintBox1.Canvas.Rectangle(Round(x1n), Round(y1n), Round(x2n), Round(y2n));
    Serp(x1, y1, x1n, y1n, n-1);
    Serp(x1n, y1, x2n, y1n, n-1);
    Serp(x2n, y1, x2, y1n, n-1);
    Serp(x1, y1n, x1n, y2n, n-1);
    Serp(x2n, y1n, x2, y2n, n-1);
    Serp(x1, y2n, x1n, y2, n-1);
    Serp(x1n, y2n, x2n, y2, n-1);
    Serp(x2n, y2n, x2, y2, n-1);
  end
end;

procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
begin
  paintbox1.Canvas.Rectangle(20, 20, 460, 460);
  Serp(20, 20, 460, 460, 4);
end;

end.

```

<http://grafika.me/node/43>

Відомо, успішні спроби застосування ФР як міри пошкодження судин людини. У статті [13] розроблено послідовність підготовки ангиографічного зображення для обчислення його ФР з використанням доступного програмного забезпечення для IBM PC. Визначено межі масштабів розгляду з урахуванням стохастичного характеру фрактальної будови ангиографічного зображення артерій стегна.

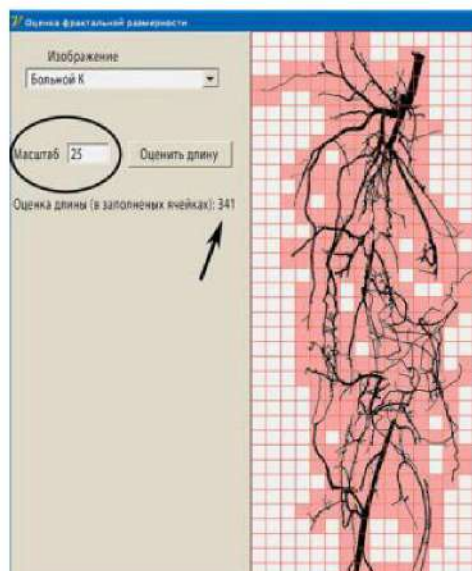


Рис. 2.6. Вікно програми Fractal.exe. масштаб розгляду (обведено) і кількість комірок (зазначено стрілкою)

Однак всі вони мають певні недоліки: перші – аналітичну складність і вузькість описуваного підкласу багатомасштабних часових рядів, другі – неадаптивність і грубість, треті – добре розв’язують пряму задачу (синтез), але зовсім не вирішують обернену (аналіз) [14].

Тому постає задача створення деякої універсальної і простої моделі, яку можна було б легко обчислювати на комп’ютері та модифікувати відповідно до потреб певного дослідження, зручну у практичній роботі (при оцінюванні параметрів та моделюванні фрактальних процесів довільної форми) [14].

Фрактальна геометрія часто пов’язана з процесами прийняття рішень або розпізнаванням зображень, тому можна прогнозувати інтеграцію інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень з багатомасштабними підсистемами аналізу даних.

Сьогодні є значна кількість методів та моделей аналізу багатомасштабних часових рядів [14]:

- звичайні моделі (загальні);
- відомчі моделі (галузеві);

Проте вони мають недоліки: перші - складність аналізу, недостатню кількість підкласів багатомасштабних часових рядів. Отже, створення універсальних і простих моделей, які можна обчислити на комп’ютері та модифікувати відповідно до потреб конкретних досліджень є актуальним та доцільним. Це дозволить оцінити параметри процесу руйнування за аналізом зламів досліджених зразків.

2.2. Використання аналітичних систем для кількісного аналізу зображень

Аналіз зображень використовується сьогодні в різних галузях, від освіти до медицини.

Сфера медичної візуалізації - галузь цифрової візуалізації, яка використовується для діагностики та лікування захворювань і швидко розвивається й активно застосовує фрактальні підходи. Недавнє дослідження Американської академії педіатрії свідчить про те, що зображення дітей з апендицитом можуть допомогти швидше діагностувати потенційні захворювання. Інші досягнення включають детальну, точну томографію мозку, легенів, сухожилів та інших частин тіла, за даними якої медичні працівники можуть краще обслуговувати пацієнтів [13].

Відомо програму під назвою «Зв'язок та медичної цифрової візуалізації» (AxioVision), яка змінює традиційний світ медицини. AV - це не лише система виявлення вищезазначених високоякісних внутрішніх органів, але й система обробки цих зображень. Це універсальна система, яка містить обробку зображень, обмін зображеннями та аналіз, щоб допомогти пацієнтам відчувати себе комфортно та доброзичливо. Відомо, що кількість подібних програм неухильно зростає.

Окремим класом є моделі фрактальних функцій - Рімана, Больцано, Ваєрштрасса та ін., які покладали великі надії на вирішення проблем радіоелектроніки, механіки, теорії хаосу тощо. Проте, це абсолютно різні функції, деякі вирази навіть не можуть бути аналітично вирішені, між ними немає кореляції, що ускладнює їх практичне застосування. Тому завдання - створити загальну модель для заміни або дублювання відомих.

SAM - це автоматизована комп'ютерна робоча станція, яка дозволяє професіоналам виконувати завдання, які забирають багато часу і сил. Основним завданням розробки медичного програмного забезпечення є автоматизація роботи профілактичних та медичних установ. Програмне забезпечення SAM використовується для такої наукової біології та медичних досліджень [8, 10]: ентомологія, гістологія, цитологія, мікробіологія, ембріологія, мікологія, паразитологія, флуоресценція.

Дослідницька САМ містить багатофункціональний мікроскоп (лабораторний або наукового класу), що дозволяє їй проводити дослідження з застосуванням різних методів. Метод обстеження в цій системі не визначений заздалегідь, але генерується користувачем, а камера має вищі вимоги до чутливості та роздільної здатності. Основна передумова вивчення САМ - універсальність мікроскопів та камер, які можна швидко адаптувати для аналізу іншого препарату.

Останніми роками технологічний прогрес домігся швидкого прогресу, значно покращивши роздільну здатність мікроскопа та поєднання функцій мікроскопа з ПК для забезпечення роботоздатності апаратно-програмного комплексу. На закордонних ринках виробники систем аналізу зображень з'явилися у 80-х ... 90-х роках минулого століття. Компанії-розробники САМ і їх постачальники компонентів зображення поділяють на дві категорії [15]:

1. САМ «під ключ», що містять мікроскоп, систему введення, ПК та програмне забезпечення. До таких належать: MECOS-CZ, ImageJ, BioImageXD, (аналітичні системи у природничих галузях: Fujifilm Україна - медичні системи, мікросистеми (універсальні та спеціалізовані системи для різних застосувань), системи прикладної візуалізації (використання) для цитогенетики: Автоматичне каріотипізація, флуоресцентний аналіз), Diagnostics International (США); Dakota Technologies, Inc. (США); IQ Products (Нідерланди); GeneFocus,(США), Biomedical Photometrics Inc. (США).

2. Компанії, що продають окремі компоненти, вхідні системи, програмне забезпечення або версії програмного забезпечення становлять окремий сегмент ринку, є багато таких компаній: Zwick-Roell, Clemex Technologies, Imaging System (INEL), Nikon, тощо.

САМ складається з системи введення зображення з макрооб'єктивом або мікроскопом, оснащеним відеокамерою, комп'ютером та програмним

забезпеченням для отримання мікроскопічних об'єктів. Об'єктами, що вивчаються в такій системі, є статичні зображення мікроскопічних об'єктів: мінеральних частинок, пор, мікродфектів, включень, клітинних структур, мікроорганізмів [15].

Автоматизовані можливості САМ передбачають наступні етапи обробки зображень [10].

- введення зображень;
- конвертування та редагування;
- вибір об'єктів чи ділянок зображення;
- зберігання та друк зображення за результатами аналізу.

Морфологічні програмні систем аналізу (програмні компоненти САМ) можна розділити на три категорії: освітні, професійні та загальні [15]. За допомогою системи навчання ви можете виконувати ручні опитування та прості обчислення (Screen Meter). Основними функціями Screen Meter є підрахунок комірок, лінійне та кутове вимірювання в ручному режимі, перетворення отриманих даних у фізичні одиниці довжини, обчислення найпоширеніших статистичних характеристик та експорт отриманих даних у формат електронних таблиць Ексель. Спеціальні системи містять ряд алгоритмів та функцій для конкретних категорій зображень (AnalySIS 5). Універсальну систему використовують для обробки та аналізу зображень будь-якого типу (QCapture Pro 7™ Software).

Основна перевага використання програмного забезпечення - перехід від суб'єктивного та якісного аналізу до об'єктивного та кількісного аналізу. Основні недоліки - складність структури та можливі помилки в описі зображення.

Biomedical image analysis (BIA) – це кластер, який дозволяє використовувати камери, відеокамери та сканери для зйомки зображень та зчитування зображень із існуючих файлів [2,3]. Результати дослідження представлені у табличній, графічній та друкованій формі, табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Програмного забезпечення САМ та його порівняльний аналіз [14]

Назва програми	Отримання з віддаленого джерела	Конвертування файла в інший формат	Налаштування параметрів зображення (висота, ширина)	Редагування зображення	Конвертація в інші кольорові бази	Виділення об'єктів в ручному / автоматизованому / автоматичному режимі	Обчислення характеристикних ознак (площа, периметр, кут нахилу тощо)	Визначення максимальних та мінімальних значень	Використання плагінів	Використання сценаріїв	Формування звітів	Передача даних у зовнішнє програмне забезпечення	Друк	Налаштування параметрів роботи програми	Калібрування програми	Наявність системи допомоги
Bio Vision	-	+	+	+	+	+ / + / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
QCapture PRO 6.0	-	+	+	+	+	+ / + / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
Motic Images Advanced 3.2	+	+	+	+	+	+ / + / +	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
MCID™ Core	-	+	+	+	+	+ / + / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
Image-Pro Plus 6.2	+	+	+	+	+	+ / + / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
MetaMorph 7.5	-	+	+	+	+	+ / + / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
ImageJ (NIH, USA)	-	+	+	+	+	+ / - / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
Pixels	-	-	+	+	-	+ / - / -	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+
NIH Image	-	+	+	+	+	+ / + / +	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Xite v3.45	-	-	+	+	-	+ / - / -	+	-	-	-	+	-	+	+	-	+
ДиаМорф	-	+	+	+	+	+ / + / +	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+
Micromed Images	+	+	+	+	-	+ / - / -	+	-	-	+	+	-	+	+	-	+
ScreenMeter	-	-	+	-	-	+ / - / -	+	-	-	-	+	-	-	+	-	+
ImageExpert Pro 3	-	+	+	+	+	+ / + / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
ImageExpert™ Gauge	-	+	+	+	+	+ / + / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+
AnalySIS Five	-	+	+	+	+	+ / + / -	+	-	+	+	+	-	+	+	-	+

Точність калібрування забезпечується використанням об'єкта мікрометра або методом калібрування з калібрувальною смужкою. Програмний комплекс надає користувачам широкий спектр інструментів для обробки та аналізу відеоданих та відеопотоків, включаючи генетику, цитологію, гістологію, онкологічні дослідження тощо. Сучасні системи є високого ступеня автоматизації, що дозволяє їх віддалено обслуговувати та зменшує залежність від медичного відеодіагностичного обладнання. Для передачі та зберігання відеоданих використовують стандарти: DICOM, IEEE, MEDIX, та ін.

Сучасний САМ порівнюють за такими параметрами:

Метод введення:

- зображення було зроблено кодером у режимі реального часу (підтримує технологію Technology Without Any Interesting Name, зокрема її останню версію TWAIN2.4)
- завантажено з диска.

Режим сегментації:

- вручну (оператор вибирає потрібний об'єкт на зображенні в ручному режимі)
- автоматизовано (оператор вводить деяку початкову інформацію (для навчання), а потім програма виконує сегментацію самостійно);
- автоматично (на основі запрограмована сегментація Система алгоритму та відомі параметри відокремлюються незалежно.

Попередня обробка вхідних зображень: Програма забезпечує додаткове оброблення зображень (зменшення шуму, корекція яскравості, контрастність, фільтрація, вибір цікавих областей тощо).

Розрахунок особливостей: Набір функцій, які компактно описують зображення. Найбільш використовуваними є параметри: периметр, площа, відношення ядра до маси, визначення кута тощо.

Обчислення статистики: математична інформація про групу об'єктів, що є предметом розгляду. До таких атрибутів належать середнє, стандартне відхилення, максимум (мінімум) тощо;

- можливість відображення інформації у візуальному форматі: малювання діаграм, гістограм, графіки тощо;
- можливість обміну інформацією з іншим програмним забезпеченням;
- використання скриптів: Є вбудовані мови (шаблони) для написання сценаріїв для пакетної обробки.

Технічна документація: наявність іншої інформаційної системи.

Типовими структурами обладнання для САМ є системи візуалізації на основі мікроскопа на основі мікроскопів, відеокамер або камер, програмні комп'ютери та принтери [2, 3, 8]. Системи візуалізації (СВ) - це складний компонент, структура якого залежить від типу системи та оптичних мікроскопів, камер, камер, пристроїв для зміни струмової лінзи, приладів фокусування, мобільних верстаків, пристроїв подачі зразків та освітлювальних приладів (рис. 2.7). СВ можуть бути побудовані на цифрових або цифрових мікроскопах і камерах.



Рис. 2.7. Структурна схема апаратної структури САМ

Мікробіологічні та металографічні прилади та програмні засоби на українському ринку реалізують провідні світові фірми, наприклад: ООО "ПромГруппПрибор" (Росія), Vainpol-VTD, Nikon, METKON (Росія), LECO.

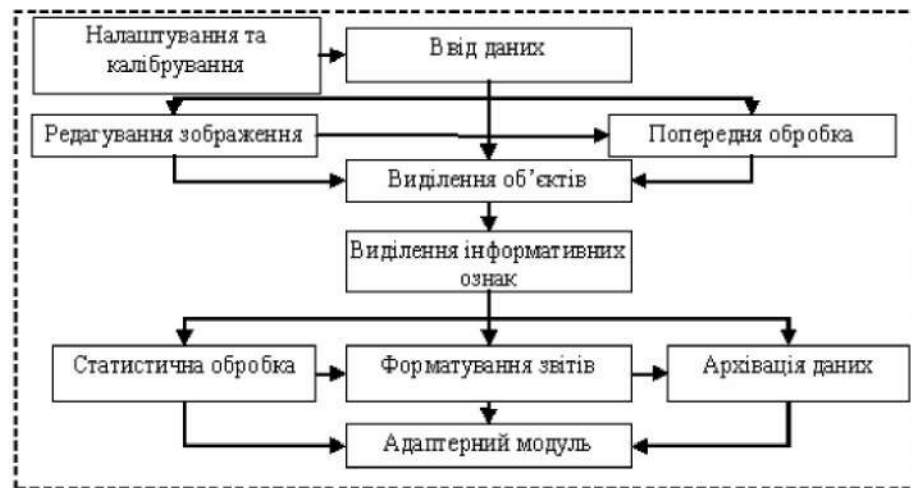


Рис. 2.8. Структура компонентів програмного забезпечення САМ

Основні параметрами комп'ютера, що забезпечує найнижчу продуктивність такої системи, це: оснащений процесором 1 ГГц, щонайменше 1 ГБ оперативної пам'яті та платою інтерфейсу USB3.2 Gen 2x2, для отримання зображень або відеопотоків з камери.



Рис. 2.9. Структура програмного забезпечення

Аналіз роботи в різних лабораторіях доводить, що продуктивність комп'ютерів використовують лише частково. У більшості випадків

комп'ютери їх застосовують лише для полегшення використання мікроскопів для отримання мікрофотографії та, у рідкісних випадках, для підтримки баз даних. У щоденній роботі лабораторії металографічного контролю перспектива використання комп'ютерних програм [4] для обробки та аналізу фотомікрографів ще до кінця не використовується.

2.3. Параметр ФР за дослідження епоксидних композитів

Неможливо впровадити сучасну передову технологію фрактодіагностування без використання матеріалів необхідної характерної складності для забезпечення структурно-механічних властивостей та міцності об'єкта. Без попереднього моделювання та дослідження цих властивостей неможливо правильно і достовірно зрозуміти взаємозв'язки у ланцюзі "властивість-композиція-структура". Фрактодіагностика є невід'ємною частиною більшості досліджень матеріалів [4, 6, 11]. Останнім часом якісний фрактографічний аналіз все більше доповнюється кількісними ознаками відповідної структури зламу [5, 12]. Найбільш поширеним методом є визначення цієї ознаки у автоматизований спосіб[1].

Кількість включень у епоксикомпозиті зазвичай невелика у відсотках від ваги смоли [11]. Хоча й застосовуються в невеликій % кількості, наповнювачі позитивно впливають на властивості композиту.

Точність та об'єктивність рішень для управління якістю в машинобудуванні залежить від удосконалення методів та методів автоматичного аналізу зображень.

Під час етапу оцифрування на зображення поверхні епоксикомпозиту впливає аддитивний та імпульсний шум. Додатковий шум - це випадковий сигнал, який додається до корисного виходу системи. У цьому випадку зайвий шум викликають аберації та крайові ефекти. На відміну від аддитивного шуму, імпульсивний шум є таким, що він впливає лише на шуканий сигнал у вибраних випадкових точках (отримане значення сигналу

в цих точках приймає випадкове значення). Імпульсний шум є особливістю цифрових систем передачі та пам'яті зображень. Тому є проблема зменшення шуму під час підготовки зображення [9].

Найпростіший спосіб вирівняти шум у зображенні - це згладжування, коли значення яскравості кожного елемента замінюється середнім значенням навколишніх елементів

$$F_{ij} = \frac{1}{p} \sum_{k,l} f_{kl} \quad (2.1)$$

де f_{kl} - безліч точок, що належать аналізованому околі точки,

p - кількість точок у околиці.

Цей метод ефективно усуває адитивний і імпульсний шум в кожному елементі зображення.

Досліджуючи мікроструктуру пошкодженої поверхні епоксидних композитів, часто доводиться вирішувати задачі визначення розміру, кривизни, фактора форми та питомої поверхні поверхні об'єкта. Усі ці завдання певним чином - це аналіз елементів об'єкта контуру.

Методи вибору контуру можна розділити на такі основні категорії:

- високопропускний фільтр-метод;
- метод просторової диференціації;
- наближення рівномірної функції.

Спільним для цих методів є необхідність розгляду меж, на ділянках зображення як областей стрибкоподібної зміни функції яскравості зображення $f(i, j)$; відрізняє ж їх математична модель поняття межі і алгоритм пошуку граничних точок.

Цю проблему можна вирішити за допомогою методу «жука» для контурної обробки алгоритму відстеження меж, який може ізолювати замкнутий контур об'єкта. Алгоритм містить такі кроки: локалізує об'єкт та вибирає деякі граничні точки початку, послідовно відслідковує контур, поки не досягне початкової точки. Якщо піксель знаходиться за межами об'єкта,

переміщає піксель за годинниковою стрілкою праворуч за контур, а якщо піксель знаходиться на об'єкті, перемістить піксель ліворуч.

Відповідно до завдань алгоритму вибору контурів у кількісній фрактографії висувають такі вимоги: вибрані контури повинні бути тонкими, безперебійними та закритими. Через необхідність застосування алгоритмів потоншення та усунення неоднорідності процес визначення контуру є складним.

3. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1. Аналіз вихідних даних на проектування, базових властивостей ФР

Штучні предмети, зокрема промислові та цивільні будівлі, можна ефективно описати простим набором геометричних примітивів: через їх неправильність та фрагментарність. Текстура таких об'єктів містить куби, кульки, циліндри, конуси та порівняно з об'єктами природного світу є простою. У зв'язку з цим виконують аналіз таких текстур, з метою опису їх у вигляді фрактала з розмірністю D .

Фрактал (лат. Fractal, дроблення) Термін, введено Бенуа Мандельбротом у 1975 р., й він стосується нерегулярних, самоподібних величин. З іншого боку, фрактал - це нескінченна самоподібна геометрія, яка повторює кожен фрагмент під час зменшення масштабу. Інваріантність шкали, яка спостерігається у фракталі, може бути точною або приблизною.

Інше визначення - це самоподібний набір фрактальних, не цілих розмірів. Самоподібний набір - це множина, представлена як об'єднання нерозділених підмножин, подібних до вихідного набору.

Основні особливості фракталів.

- вони мають тонку структуру, $d. H$. Вони містять багато дрібних складових.
- вони занадто нерегулярні, щоб їх можна описати традиційною геометричною побудовою;
- вони мають форму самоподібності (припускають).
- вони мають фрактальний вимір, що називається вимір Мінковського.

Фрактали сьогодні використовують для аналізу текстури аерофотознімків, зроблених для аналізу поверхні порошків та інших пористих середовищ, для аналізу поверхні хмар тощо.

Розмір текстури ФР, однак, сильно залежить від вибору методу оцінки. Тому, якщо ми використовуємо різні методи для оцінювання розміру фракталу, ми отримуємо різні величини параметру D . Тому слід аналізувати текстури групою методів. Крім того, не всі текстури сильно відрізняються за розміром фрактала. У зв'язку з цим бажано оцінити текстуру поверхні руйнування до того, як розмір фрактала введений у систему функцій.

Оцінка мікромеханізмів руйнування ґрунтується на обраному методі оцінювання розміру фрактала. Оскільки розмір фрактала обчислюється шляхом оцінки регресії вибірки, закономірно оцінювати фрактальну текстуру за коефіцієнтом кореляції між логарифмом випадкової величини та логарифмом заданої крокової функції. У цьому випадку фрактальну розмірність текстури можна одержати так:

1. Визначити коефіцієнт кореляції для етапів: Значення кроку з максимальним значенням функції є максимальним кроком у певному діапазоні кроків у оцінці значення ФР.

2. Для методу оцінки ФР не враховуйте оцінку розміру фрактала, використовуючи низькі коефіцієнти кореляції, як ряд експериментальних середніх.

3. Якщо значення коефіцієнта кореляції менше 0,7, не вводите фрактальний розмір у системі функцій сегментації текстури.

Оцінка фрактальної текстури є важливою особливістю фрактальної сегментації.

Поширення фрактальних описів ґрунтується на тому, що більшість просторових систем у природі є нерегулярними та фрагментарними, і евклідовим геометричним пристроям важко описати форму цих систем.

Наприклад, узбережжя острова не є прямим чи круглим, і немає інших складних кривих, які можна використовувати для опису та пояснення його форми, не будучи занадто складними та складними. Фрактальна структура -

одна з багатьох текстур, що досягають точності опису зображення, описуючи дрібніші об'єкти.

Фрактальна екстраполяція може представляти деякі динамічні текстури, наприклад лісові масиви та водні хвилі, хмари, пористі мінерали та металеві спороди. Суть фрактального методу у сенсі розпізнавання об'єктів полягає в наступному. Контури штучних предметів (цистерни, машини) описуються надпорядковими послідовними рівняннями. Природні об'єкти, зокрема дерева - фрактальні, тобто вони мають фрактальні розміри. Можна використовувати цю властивість із фрактальним наближенням об'єкта зображення для створення системи розпізнавання властивостей зображень. Така система не може побачити кущі, але може легко розпізнати штучні предмети, які ховаються за кущами. Основна перевага цього методу перед іншими методами полягає в тому, що він не схильний «зливання з фоном». На результат розпізнавання впливає не колір і контраст об'єкта на фоні, а лише область, яка займає потрібний об'єкт у зображенні. Недоліком цього методу є те що фрактальний аналіз дозволяє виявити об'єкти, які є більшими за структуру фонових елементів, рис. 3.1.

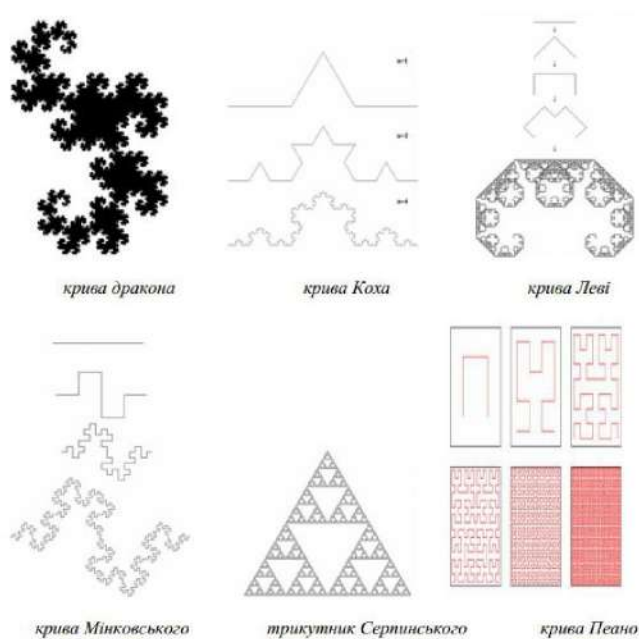


Рис. 3.1. Типові геометричні фрактали

Для побудови алгебраїчних фракталів (рис. 3.2) були використані ітерації нелінійного відображення, задані простою алгебраїчною формулою. Найбільш вивчений 2D випадок. Нелінійні динамічні системи можуть мати кілька стабільних станів. Кожен стабільний стан (аттрактор) має певну область початкового стану, в якій система повинна увійти в цей стан. Тому фазовий простір розкладається на аттракторні області.

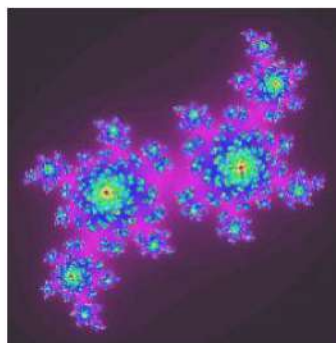


Рис. 3.2. Алгебраїчний фрактал - Множина Жюліа

Якщо фазовий простір є двовимірним простором, систему можна отримати, забарвивши область аналізу різними кольорами (ітеративна обробка). Змінюючи алгоритм вибору кольору, ви можете отримати складні фрактальні візерунки зі складними багатобарвними елементами. Дійсно дивно, але математики використовували оригінальний алгоритм для створення дуже складних, нетривіальних структур.

Розмір фрактала D визначаються як

$$D = \frac{\log N}{\log(1/r)} \quad (3.1)$$

де $1/r$ – співвідношення подібності, N – кількість кроків, необхідних для того, щоб покрити аналізовану криву.

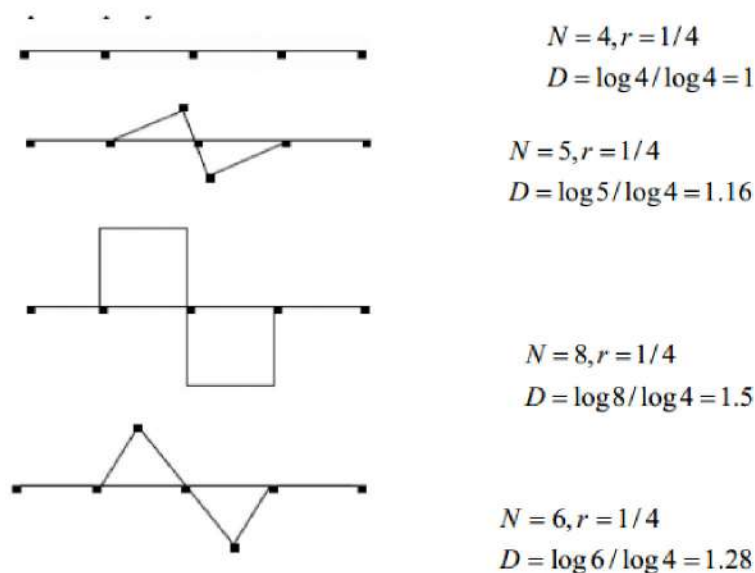


Рис. 3.3. Визначення розміру фрактала за допомогою чотирьох ламаних ліній

Фактично розмір фрактальної кривої оцінюється шляхом вимірювання довжини кривої кривої за різних розмірів кроку. Розмір фракталу D можна оцінити, використовуючи наступне рівняння регресії:

$$\begin{aligned} \log L &= C + B \log G \\ D &= 1 - B \end{aligned} \quad (3.2)$$

де L – довжина кривої, B – нахил регресії, G – величина кроку, C – стала.

Давайте докладніше розглянемо методи, які застосовуються для реалізації фрактальних методів для хмарного аналізу. Основою цього методу є виведення співвідношення Мандельброта між колом та площею об'єкта. Для кіл, квадратів, рівносторонніх трикутників та інших многокутників відношення периметра до квадратного кореня обмеженої площі не залежить від розміру фігури і є сталим. Так само відношення довжини нефрактальної берегової лінії острова до квадратного кореня її площі не залежить від розміру місцевості. Проте, у разі фрактальності берегової лінії, її довжина становить $L^{(\delta)}$ й є залежною від довжини еталону (δ) . Вона прямує до нескінченності, у разі якщо еталон наближується до нуля.

Площу островця $A(\delta)$, можна визначити за кількістю квадратів (δ^2) , які на ній розміщені є скінченною. Мандельброт для фрактальної берегової лінії вивів співвідношення яке встановлює зв'язок між периметром і площею:

$$L(\delta) = C\delta^{(1-D)} [A(\delta)]^{D/2} \quad (3.3)$$

Воно є чинним за будь-якого еталону довжини (δ) , достатньо малого, для задовільного вимірювання найменшого з острівців. Залежність (3.3) застосовували для досліджень геометрії хмар, ділянок дощу, розміри яких є в межах від 1 до $1,2 \cdot 10^6$. Було виявлено, що периметр хмари пов'язано з її площею залежністю (3.3) з фрактальною розмірністю $D = 1,35 \pm 0,05$.

Водночас час ці оцінки є дійсними як для купчастих, так і для пір'ястих хмар. У роботі А. Вальдфогеля він проведено аналіз ФР хмари з сильною конвекцією та визначено периметр та площу за певний часовий інтервал (1-хвилинний інтервал) у площині перерізу, за сталого коефіцієнту відбиття. Встановлено наступні закономірності: для хмар із радіусом понад 8.0 км розмір фрактала (D) становив $1,36 \pm 0,1$. Для хмар із радіусом від 3.0 км до 8.0 км, $D = 1,0 \pm 0,1$. Нарешті, хмари менше 3.0 км в перерізі не є фрактальними.

Мандельброт запропоновано не лише визначення фракталів, але й алгоритм побудови фракталів, названі на честь відомих вчених. Алгоритм створення набору Мандельброта ґрунтується на ітераційному обчисленні наступної формули:

$$Z[i+1] = Z[i] \cdot Z[i] + C \quad (3.4)$$

де Z і C – є комплексними змінними. Ітерації піддають кожну стартову точку C прямокутної або квадратної ділянки – підмножини комплексної площини. Виконують ітераційний процес до тих пір, поки $Z[i]$ не буде за межами кола попередньо заданого радіусу, центром якого є точка $(0,0)$, або після значної кількості ітерацій. На основі кількості ітерацій, за яких $Z[i]$ є

в середині кола, визначають колір точки C . Якщо $Z[i]$ є у середині кола за великої кількості ітерацій - точку сітки «фарбують» чорним кольором. Множині Мандельброта (рис. 3.3) належить ті точки, що за нескінченної кількості ітерацій не визначаються як належні нескінченності.

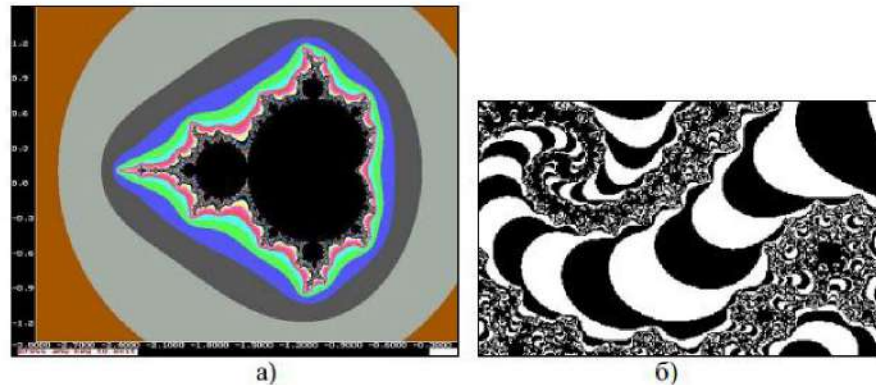


Рис. 3.3. Множина Мандельброта:

а – загальний вигляд; б - ділянка межі множини Мандельброта (збільшено)

Побудову ще одного фрактального набору - Сніжинки Коха (рис. 3.4), починають з правильного трикутника довжиною 1. Сторони трикутника є основою для вихідного положення. Крім того, на кожному етапі ітерації кожен член замінюють ознакою - полілінією, що містить одну третину полілінії, з двома сторонами прямокутного трикутника між полілініями, а довжиною сторони - $1/3$. Усі відрізки - краї отриманої кривої – є базовою лінією для наступної ітерації. Крива, створена n -ю ітерацією за будь-якого фінального n , називають префрактальною. Крива Коха стає фрактальною лише тоді, коли n переходить до нескінченності. Останній ітераційний процес – створення фрактального візирунку - нескінченно довга лінія, що оточує обмежену область. Отже, для кожного кроку ітерації, кількість боків отриманого багатокутника зростає у чотири рази, а довжина кожної сторінки зменшується лише втричі, тобто довжина n -го багатокутника дорівнює $3 \cdot (4/3)^n$ і тяжіє до нескінченності за збільшення значення n .

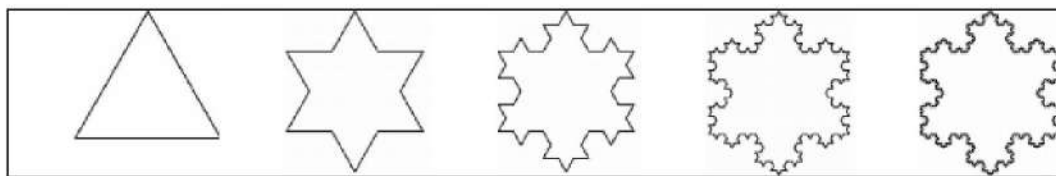


Рис. 3.4. «Алгоритм» 5 кроків створення сніжинки Коха

У разі прийняття площі створювального трикутника за 1, площа під кривою:

$$S = 1 + \frac{1}{3} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{4}{9}\right)^k = 1.6 \quad (3.5)$$

Останнім часом фрактальний метод почали застосовувати для розроблення методів розпізнавання радіолокаційних зображень. Завдання застосування таких підходів є наступним: відомо, що важко знайти танк, замаскований під кущ. Навіть з добрими телевізійними та телеметричними сигналами це важко. Це можна зробити за допомогою фрактальних методів. Як було сказано вище, контури штучних предметів (цистерн, автомобілів) сформовано з ліній, які описують рівнянням певного порядку. Але природні рельєфні одиниці – кущі, дерева є природними фракталами, отже вони мають фрактальні розміри. Цей принцип покладено у підгрунття нової системи розпізнавання зображень. Системи виявлення не можуть бачити кущів, але вони легко ідентифікують штучні предмети, які приховано за кущами. Маскування може бути корисним, для приховування таких об'єктів, проте лише у разі, якщо воно не було сформовано кривими другого порядку, як зазвичай.

Іншими словами, якщо виміряти розмір природного ландшафтного зображення, це буде дробове число. Розмір геометрії такого об'єкту близький до 2 (через похибки вимірювання). Наприклад, якщо розмістити прямокутник над природним зображенням (див. рис. 3.5), ФР зображення значно зміниться.



Рис. 3.5. Фото аерозйомки для виявлення прихованих військових об'єктів

Головною перевагою цього методу перед іншими є те, що не потрібно витрачати жодного часу та зусиль на покращення якості зображення. Це мало впливає на результати. Ще одна перевага полягає в тому, що для цього потрібні зображення з меншою роздільною здатністю, ніж інші методи. На результат впливає лише площа, зайнята штучним предметом на зображенні, а не контраст, як зазвичай.

Самоподібність - основна особливість фракталів, тобто вона є більш-менш рівномірною у широкому діапазоні шкал. Тому невеликі фрактальні фрагменти виглядають дуже схоже на великі фрагменти. В ідеалі ця подібність підтримує фрактальний предмет постійним для збільшення.

Відомі певні шкали мінімальної довжини для регулярних фракталів. Для природного фракталу є певний мінімальний масштаб довжини l_{\min} за якої, на відстані $l \approx l_{\min}$ зникає основна властивість фракталу – самоподібність. Також, за великих довжин $l > l_{\max}$, де l_{\max} – геометричний параметр об'єкту, ця властивість самоподібності також не виконується.

Властивості природних фракталів вивчають в масштабах l , за умови виконання умови: $l_{\min} \leq l \leq l_{\max}$.

Зауважимо, що абсолютно самоподібні властивості притаманні лише регулярним фракталам. Якщо не детермінованого способу побудови, коли деякі елементи випадковості вводяться в алгоритм генерації (стосується, наприклад низки фізичних процесів), це називають випадковим фракталом. Основна відмінність між ними та детермінованим випадком полягає в тому, що самоподібні властивості є дійсними лише в тому випадку, якщо всі статистично незалежні реалізації об'єкта були усереднені. Хоча частина фрактала може не зовсім збігатися з вихідним фрагментом, але їх статистичні властивості, як правило однакові.

Фрактали можуть стискати зображення, але якість таких зображень втрачається, як і за інших методів. Однак фрактальна компресія може дати кращі результати у певних випадках. Класичний алгоритм Хаффмана LZW, ґрунтується на методі стиснення RLE, не враховує природу стислих даних, тому він має недоліки за обробки зображень. Фрактальне стиснення зображення – це алгоритм стиснення зображень з втратою, заснований на системних додатках IFS. Алгоритм, як відомо, дозволяє дуже значні коефіцієнти стиснення для реальних світлин природних об'єктів (найкращий приклад - до 1000 разів за прийнятною візуальною якістю).

Основна проблема фрактальної компресії полягає в тому, що стиснення-декомпресія проводиться швидко і чітко, а прямий процес вимагає від машини потужних інтелектуальних можливостей. При стисненні оригінальний розмір зображення не зберігається, увагу приділяють лише співвідношенню сторін. За умови зменшення рівня стиснення, слід відрегулювати розмір, який найкраще підходить для обробки. За допомогою цього можна вирішити проблему якості на кінцевому зображенні. Якщо встановити новий розмір більше за старий, до

нового зображення додаються елементи, схожі на інші пікселі. Навіть якщо обробляються природні об'єкти, такі як граніт, заміна є майже непомітною.

В основі методу фрактального кодування є розпізнавання самоподібних ділянок зображення. Патент на цю операцію було одержано у 1990-1991 роках. Більшість методів фрактального кодування/розкодування, що застосовують сьогодні, ґрунтуються на доменних і ранжованих зображеннях, квадратичній системі, яка охоплює всі зображення. Фрактальне кодування напівтонових зображень ґрунтується на припущенні, що кожне зображення можна аналізувати локально, так само як і різні його частини. Існуючі фрактальні алгоритми стиснення зазвичай дотримуються цієї схеми кодування. Зашифроване зображення поділяють на багато блоків (рангів), що не перекриваються. Кожен блок шукає більший блок (область) у тому самому зображенні, а його пікселі перетворюються на пікселі у рядках, шляхом перетворення. У цьому випадку пошук рангових областей і доменів відповідності потребує повного переліку варіантів, що може призвести до зростання обчислювальних витрат. Перетворюючи домени в рангові області, може бути створений образ, який перетворює зображення А в зображення Б. У цьому випадку код - це положення та розмір ієрархічної області та коефіцієнт перетворення, що описує самоподібність зображення. Кількість бітів, необхідних для опису коду, значно менше кількості бітів, необхідних для опису вихідного зображення. Стиснення - це відношення зображення бітових зображень до бітового зображення коду. У відомому методі стиснення фрактального зображення значення цього коефіцієнту може сягати 100 і має достатньо хорошу якість відновлення. Зображення, закодовані таким чином, використовують принцип відображення стиснення, де зазначено, що відображення стиснення, виконані у метричному просторі, мають одну фіксовану точку. Зображення, яке впливає на весь метричний простір, формується шляхом перетворення домену в рейтинг домену [26].

Відповідно до цього методу, зображення поділяли на багато ієрархічних підобразів, що не перекривалися, і визначали багато перекритих доменних зображень. Для кожного блоку рівнів алгоритм кодування знаходив найбільш відповідний доменний блок та афінне перетворення та перетворював домен в певний блок. Структура зображення відображено у системі ієрархічних блоків, доменних блоків і перетворень. Основна складність за фрактальної компресії полягає в тому, що для пошуку правильного блоку домену зазвичай потрібен повний пошук. Оскільки цей пошук завжди повинен порівнювати два масиви, процес досить тривалий.

Порівняно просте перетворення можна звести до роботи скалярного добутку двох масивів, але навіть обчислення скалярного добутку займає тривалий час.

Ще одна сфера фрактальної обробки зображень, крім стиснення, - це їх генерування. Сьогодні існує значний пакет програм (від простого фрактального SSE до складного 3D, анімації та IFS). Всі вони ґрунтуються на відкритті Мандельброта: коли ви малюєте певні точки на складному шарі, ви можете створити набір зображень Мандельброта які мають абстрактний вигляд Координати точки в складній площині замінюють за рівнянням Мандельброта, а результат - координатами іншої точки. Результат, отриманий введенням координат першої точки - це початок наступної ітерації, а результат вводиться в наступне рівняння і т.д. Хоча фрактальна наука ще дуже молода, фрактальні методи у цих двох основних сферах застосування знаходяться на відносно високому рівні. Існує ряд програм для створення або стиснення зображень, деякі з яких дуже ефективні в обробці зображень.

Фрактальні типи, хоча і невідомі, є потенційно фракталами на основі ітеративних функціональних систем. М. Барнслі винайшов метод для побудови фрактальних зображень на основі самоподібності (СФЗ) зображувальних елементів, включаючи моделювання зображення на

декілька менших частин самого себе. Найвідоміші зображення СФЗ - це чорні папороті, у яких кожен листочок є мініатюрною копією самої папороті [15].

СФЗ - це цілий набір стислих афінних перетворень. Як відомо, афінні перетворення включають масштабування, обертання та паралельну передачу. Якщо коефіцієнт масштабування менший за 1, афінне перетворення вважається стисливим. Використовуйте афінну трансформацію, щоб більш детально побудувати криву Коха. Кожен новий елемент кривої містить чотири ланки, отримані від елемента форми шляхом масштабування, обертання та проходження.

1. Для отримання першого посилення достатньо три рази стиснути початковий сегмент. Слід зазначити, що однакове масштабування стосується всіх посилень.

2. Наступні з'єднання здійснюються з використанням усіх можливих перетворень: потрібне стиснення, обертання на 60 градусів та $1/3$ паралельного перенесення вздовж осі X.

3. Структура третього з'єднання подібна до структури другого з'єднання: стискається 3 рази, обертається на 60 градусів і передається $2/3$ паралельно вздовж осі X.

4. Останнє з'єднання: 3 компресії, $2/3$ паралельної передачі вздовж осі X.

Якщо вибрати початкову точку для фрактального синтезу, застосувати випадкове перетворення IFS до цієї вихідної точки та перемістити її до іншого кінця екрана. Портуючи цей процес багато разів (достатньо для 100 ітерацій), і через деякий час точка почне плавати над аттрактором (безліч усіх можливих траєкторій), що є фрактальним зображенням. Кожне нове положення точки забарвлюється іншим кольором, ніж фон. Є одне підтвердження, яке доводить, що отриманий аттрактор закритий.

Щоб блукаюча точка зафарбовувала нові пікселі, а не блукала старими, використовують ймовірність появи певного афінного перетворення на основі перетворень IFS. У разі вибору початкової точки таким чином що вона зразу з'являється на атракторі - вона починає блукати в околі цього атрактора, не зміщуючись в інші ділянки екрану. Аналізуючи кожне перетворення окремо, слід відзначити, що де б ми не починали, після кількох ітерацій точка припиняє рух по екрану. Точка зупинки є нерухомою точкою – це розв'язок системи лінійних рівнянь двох змінних, який знаходять методом простої ітерації. Нерухома точка кожного перетворення є складовою атрактора. Тому за початкову точку при побудові фрактала беруть нерухому точку першого перетворення з набору СФЗ.

3.2. Обґрунтування вибору методів обчислення ФР

Дослідження містить наступні основні етапи: оцифрування оригінального монохромного зображення, фільтрування та повторне оцифрування одержаного зображення.

Щоб визначити положення тріщини щодо кожного пікселя, слід визначити, чи належить піксель до поверхні тріщини чи до фону. Це завдання виконували з допомогою бінаризації. У бінарному зображенні є білі пікселі (фон) та чорні пікселі (об'єкт). Аналіз тріщин був виконаний на поверхні зображення епоксикомпозитів за допомогою програмного забезпечення "Fractalys", розробленого Г.Вуйделем (Франція), яке раніше було протестовано на модельних зображеннях серветки Серпінського.

Програма Fractalys дозволяє аналізувати та визначати фрактальний вимір кількома способами:

1. Сітковим (grid)
2. Радіусу мас (radius mass)
3. Методом розширення (dilation)
4. Кореляції (correlation)

5. Згортки Гауса (gaussian convolution)
6. Подрахунком клітин (box-counting)
7. Мережевим (Network)

Сітковий. Це найпоширеніший метод оцінювання ФР. Зображення вкривали квадратною сіткою, а відстань сітки ε змінювали. Для кожного значення ε , число квадратів $N(\varepsilon)$ є сумою комірок де значення існує. Зазвичай ε набуває значення 2.

Параметри: Можна обрати центр, вибравши піксель, перемістивши курсор на зображення або ввівши безпосередньо координати. Також можна використовувати центральну панель зображень. Розмір аналізованої ділянки визначає значення множини ε .

Радіус мас. Цей метод застосовують до певної точки, яку називають центром обробки даних, і визначають закон розподілу моментів навколо неї. Площу навколо цієї точки виділяють, а радіус R поступово збільшують. На кожному кроці в коло додають загальну кількість зайнятих точок $N(\varepsilon)$. У цьому способі ε дорівнює $2 \cdot R + 1$.

Варіанти: обчислюють центральну точку та форму (круглу або квадратну) об'єкту, який слід досліджувати.

Споріднені методи. Кожну точку малюнка оточує невелике квадратне вікно. Кількість зайнятих точок у кожному вікні додають. Таким чином можна визначити середню кількість точок, яку можна обчислити у певному вікні розміру. Цей же процес працює і для більших вікон. Вісь X графіка представляє розмір сторінки вікна обчислення $\varepsilon = (2i + 1)$. Вісь Y являє собою середню кількість точок, які обчислюють у вікні.

Теорія кореляційного аналізу враховує відношення вимірювань фрактального розміру другого порядку до існування двох точок на заданій відстані (середня відстань між парою наявних пікселів). В основному, можна вибрати будь-яку форму для вікна, наприклад - коло, шестикутник

тощо. Оскільки пікселі є квадратними, помилок округлення можна уникнути, вибравши квадрат.

Параметри: Максимальний розмір вікна (ϵ).

Метод розширення. Цей метод ґрунтується на алгоритмі Манковського та Булігана. Мета - використовувати метричні теоретичні методи для визначення розміру об'єкта. У цьому аналізі кожна точка оточена квадратом розміру ϵ , поверхню якого вважають повністю зайнятою. Отже, розмір цих квадратів зростає і вимірюємо загальну площу $A(\epsilon)$, зайняту за кожного етапу. Зі зростанням площі квадрату якість заготовки стає меншою, ніж маса пропущена ϵ , і отримується приблизне значення для початкового вигляду. Із зростанням перекриття квадратів, загальна площа, яку займає задане значення ϵ , стає меншою, ніж у тому випадку, коли включається однакова кількість підстановок, що утворюють оригінальну форму. Діленням загальної площі на квадратну поверхню тіла (ϵ_2) одержуємо наближене значення кількості елементів $N(\epsilon)$, необхідних для покриття всього тіла.

Варіанти: Кількість.

Гауссова згортка. Якщо зображення зведено до кривої, ми можемо використовувати інший метод обчислення - згортку Гаусса. На відміну від інших методів, згортку Гаусса застосовують для кривих замість зображень. На кожному кроці ітерації крива стає плавнішою. У цьому випадку елемент структури (який зростає на кожному кроці ітерації) - це зміна функції Гаусса для згладжування кривої. Вісь x є дисперсією функції Гаусса, а вісь y представляє довжину кривої (у пікселях), розділену на дисперсію.

Параметри: кількість кроків та максимальна дисперсія (у пікселях).

Коробковий метод. Цей метод передбачає знаходження мінімальної кількості площ ϵ , які є достатніми для охоплення всіх чорних пікселів.

ФР сітковим методом була визначена у [17], окрім того, кожен елемент зображення був оточений рамкою квадратної форми для того, щоб визначити кількість пікселів в обмеженій області.

Використання прогресивного методу апроксимації (наближення) збільшує аналізоване вікно з метою визначення кількості чорних пікселів в кадрах різного розміру. За результати оброблення зображення одержано низку точок (емпірична крива), де вісь абсцис є розміром бічної грані рамки, а вісь ординат відображає кількість $N(1)$ елементарних фрагментів зображення (в пікселях) оточених рамкою певного розміру [17]:

$$N = \varepsilon^{-D} + c \quad (3.6)$$

де N – кількість пікселів чорного кольору у аналізованому вікні;

ε - величина елементарної площі;

D – ФР;

c – цей параметр опису імперичної кривої.

Насправді розподіл пошкоджень за деякими дефектами дуже нерегулярний. Однак експериментальним шляхом було встановлено, що кількість тріщин є фрактальним параметром у обмеженому діапазоні [16, 20]. Це означає, що ФР може бути використана як діагностичний параметр для аналізу множинних дефектів. Загальні коментарі щодо фракталів та фрактальних розмірностей можна знайти в [16,20] та інші працях.

Використано логарифмічне перетворення, що забезпечило отримання кривої за допомогою розв'язку експоненціального рівняння [16]:

$$\lg(N(\varepsilon)) = -D\lg(\varepsilon) + c \quad (3.7)$$

Оскільки реальний графік не є ідеальним фракталом (це не безперервна функція), була проведена апроксимація отриманого масиву та обчислено коефіцієнт кореляції.

4. НАУКОВО-ДОСЛІДНА ЧАСТИНА

4.1. Характеристика об'єкту або предмету дослідження

Отже, фрактал - це об'єкт, елементи якого успадковують властивості батьківської структури. ФР - це чітка кількісна ознака структурних параметрів матеріалів зі складними структурами, такими як зерна, межі зерна, площини руйнування, скупчення дислокацій, дрібні частинки другої фази тощо. ФР відображає компактність простору, займаного досліджуваними конструктивними елементами, [6]

Сьогодні актуальність дослідження ФР зростає. З'явилися нові обчислювальні методи, які є результатом розпізнавання помилок або вдосконалення існуючих методів. Розглянемо найпоширеніші методи, які вичено у роботі.

Радіус маси

(radius mass)

Цей метод застосовують до певної точки, яку називають центром обчислення, і вона визначає закон розподілу моментів навколо неї. Виділюють область в околі цієї точки, а радіус R поступово зростає. На кожному кроці додають загальну кількість зайнятих точок $N(\epsilon)$ у межах кола. У цьому методі ϵ становить $2.R + 1$.

Радіус маси визначає відношення площі в межах даного радіуса до розміру цього радіуса (або поля зору). Якість вимірювання можна оцінити за радіусом [1] за шкалою логарифмічної площі.

Функція. Особливістю цього методу є його унікальність. Цей спосіб підходить для колоподібних об'єктів.

Коробковий метод

(Box-counting)

Цей метод обчислює кількість комірок, необхідних для повного покриття об'єкту комірками певного розміру. На практиці до об'єкта застосовують

звичайну сітку, після чого обчислюють кількість зайнятих комірок. Логарифм $N(R)$ порівнюють з логарифмом $1/R$ (де R - розмір однієї комірки), кількість зайнятих комірок дає лінію, а градієнт відповідає розміру поля. Цей спосіб удосконалений у Гарфі, де є різниця між повністю зайнятими та частково заповненими клітинами. Побудувавши логарифм комбінації комірок, можна обчислити: повністю зайняті, повністю незайняті (вільні), частково зайняті [1].

Особливість. Коробковий метод підрахунку заснований на цифровому представленні об'єктів, що досліджуються. Його результативність залежить від орієнтації сітки та її вихідного положення. Більше того, для обчислення інтенсивності (кількості комірок на зображенні) потрібна спеціальна обробка, наприклад, з використанням довільних випадкових символів.

Метод розширення (dilation)

Цей метод ґрунтується на алгоритмах Манковського та Булігана. Мета - використовувати теоретичні вимірювальні методи для визначення розміру об'єкту. У цьому аналізі кожна точка оточена квадратом розміру ε , поверхня якого вважається повністю зайнятою. Тоді розмір цих квадратів поступово зростає, при цьому вимірюють загальну площу $A(\varepsilon)$, зайняту кожною стадією. Із збільшенням площі маса зайнятої поверхні стає менше маси, пропущеної ε , і ми поступово наближаємось до початкового вигляду. Оскільки все більше і більше квадратів перекриваються, загальна площа, що займає задане значення ε , стає меншою, ніж у випадку, коли включається однакова кількість підстановок, кожна з яких формує оригінальну форму. Поділивши цю загальну поверхню на поверхню тіла площею (ε^2) отримаємо приблизну кількість елементів $N(\varepsilon)$, необхідних для покриття всього тіла.

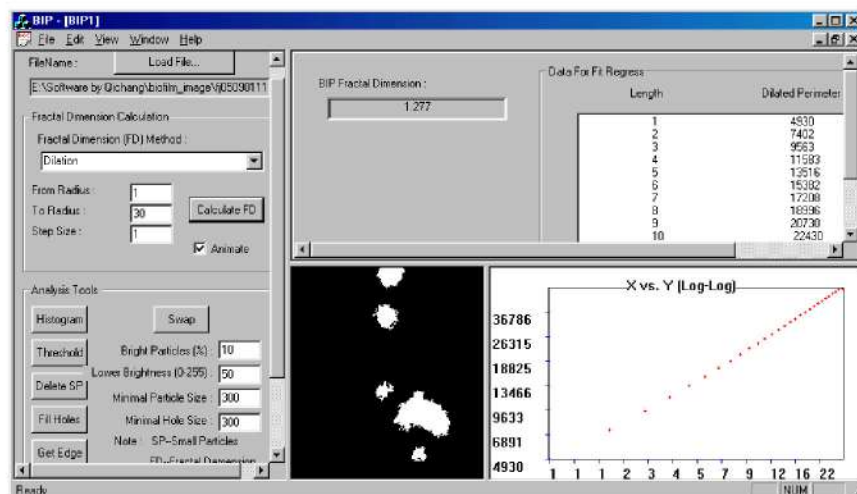


Рис. 4.1. Інтерфейс програми для обчислення ФР

<https://users.cs.fiu.edu/~giri/BIP/>

Dathe та ін. (2001) опублікували звіти про застосування цього методу у галузі ґрунтознавства. Метод розширення, має природу близьку до методу «підрахунку комірок», але використовує інші структуровані елементи замість комірок для покриття поля обстежуваного об'єкта, Dathe et al., 2001. Зображення сформоване квадратними або прямокутними пікселями. Коли використовують коло, його діаметр задається пропорційно колу (у способі підрахунку комірок - довжина сторони комірки). Якщо є потреба мати однаковий ступінь у кожному напрямку, приріст ортогональних та діагональних ліній повинен бути зміщений на $\sqrt{2}$, що відповідає гіпотенузі площі поперечної одиниці довжини (Кауе, 1989). Довжина досліджуваного об'єкта обчислюється за кількістю кіл, а потім визначається нахилом лінії регресії між логарифмом довжини об'єкта та логарифмом діаметра. Він визначається наступними співвідношенням:

$$L(\delta) = c\delta^{1-D_L}$$

Особливість. Dathe та ін. (2001) протягом тестування методу підрахунку комірок та метод розширення на одному зображенні, було встановлено, що значення ФР, отримані цими двома методами, незначно відрізняються. Однак вони виявили, що фрактальні розмірності оцінок двох методів

відрізняються: розмірність методу підрахунку комірок - це розмірність Колмогорова, а розмірність, отримана методом розширення, є вбудованим розміром (Маньковський-Буліган).

Метод кореляції (correlation)

Кожну точку рисунку оточує невелике квадратне вікно. Кількість зайнятих у кожному вікні точок, додається. Таким чином можна визначити середню кількість балів, яку можна обчислити у вікні певного розміру. Цей самий процес застосовували й для більших вікон. Вісь X графіку являє розмір сторінки вікна обчисленої за формулою: $\varepsilon = (2i + 1)$. На осі Y відкладено середню кількість точок, обчислених у вікні.

Теорія кореляційного аналізу співвідносить вимірювання фрактального розміру другого порядку до існування двох точок на заданій відстані (середня відстань між парою наявних пікселів). В основному, можна обрати будь-яку форму для вікна, наприклад: коло, шестикутник тощо. Оскільки пікселі є квадратними, помилок округлення можна уникнути, вибравши квадрат. У теорії хаосу кореляційний розмір (представлений ν) є мірою вимірювання простору, зайнятого набором випадкових точок. [1-3]. Справжнє використання корельованих розмірів полягає у визначенні розмірів фрактального об'єкта (можливо, дробових).

Метод «кореляційного розміру» має перевагу прямих та швидких розрахунків. Отже, якщо доступно лише кілька точок, шум невеликий і зазвичай відповідає іншим розрахункам розмірностей.

Для будь-якої N -точки в m -мірному просторі [3]

1. Стандартне співвідношення асоціацій між подібними об'єктами та між об'єктами з подібними ознаками.
2. Симетрична кореляція - симетричне розширення може створювати плавні межі кінцевих точок сигналу, з метою уникнення відриву кінцевої

точки. Використано дискретну косинусну трансформацію (DCT) для проведення симетричної кореляції без збільшення кількості проб.

Особливості. Цей метод можна використовувати для відмежування (детермінованої) хаотичної поведінки від справді випадкової поведінки. Проте, якщо детермінований механізм генерації дуже складний, він метод не може добре розпізнати детерміновану поведінку. (Grassberger and Procaccia, 1983)

Методи асоціації У нашому випадку стандартна «біла асоціація» дає абсолютно однакові результати, оскільки тип зображення добре підходить для обчислення цими методами. Оскільки матеріал нерівномірний і містить різного роду включення, інші два варіанти методу кореляції не підходять і не можуть дати правильних результатів. Якщо шари на матеріалі мають різну форму або є симетричними що повторюються протягом усього зразка, значення D будуть однакові. Ми також створили таблицю коефіцієнтів кореляції для аналізованих методів (табл. 3). Кореляція (від лат. Correlation) - це статистична кореляція між величинами, яка зазвичай не є чисто

Визначали математичне очікування добутку відхилень випадкових величин X і Y від їх середнього:

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot (Y_i - \bar{Y})}{n}$$

Значення μ не є мірою кореляційного зв'язку, бо залежить від значень величин X та Y . Тому застосовують поняття коефіцієнту кореляції.

Коефіцієнтом кореляції називають відношення добутку моменту кореляції до квадратичного відхилення:

$$coef.cor. (r) = \frac{\mu}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}) \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}}$$

де X_i, Y_i – чисельні значення величин. Незалежні величини мають $r = 0$, для функціональних залежностей $coef.cor. = \pm 1$. У разі якщо ріст X зумовлює зростання Y , то $coef.cor.$ – є додатнім, якщо знижує його значення – то $coef.cor.$ – від’ємний.

Квадрат коефіцієнта кореляції є коефіцієнтом детермінації (r^2). Він показує, наскільки загальна зміна атрибутів результату визначається досліджуваними чинниками. Коли коефіцієнт детермінації виражено у відсотках, можна оцінити на скільки зміна (варіація) залежної змінної зумовлена зміною коефіцієнта. Коефіцієнт детермінації вказує, ступінь зміни залежної змінної (виходу) Y у разі зміни незалежної змінної (вхід)

$$X. r^2 = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2},$$

де \hat{y} - значення змінної за побудованою регресійною моделлю;

\bar{y} - загальне середнє значення величини залежної змінної;

y_i – дійсні значення залежної змінної.

Діапазон значень коефіцієнта детермінації становить від 0 (немає лінійної залежності між показниками) до 1 (кореляції між показниками немає).

Застосування змінних $X_i (i=1..m)$ в множинній регресії, а відповідно й ступінь свободи моделі призводить до зменшення коефіцієнта детермінації. Тому розрахунок моделі повинен бути скоригований для врахування ступенів свободи, залишків та сумарної дисперсії. Відкоригований коефіцієнт детермінації визначають за формулою:

$$R_{\text{скор}}^2 = 1 - \frac{S_{\text{зат}}^2}{S_{\text{заг}}^2},$$

$$\text{де } S_{\text{зат}}^2 - \text{залишкова дисперсія } S_{\text{зат}}^2 = \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{n - m - 1};$$

$$S_{\text{заг}} - \text{загальна дисперсія моделі } S_{\text{заг}}^2 = \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n-1}.$$

Підставивши залежності обчислення дисперсії у формулу скоригованого коефіцієнта детермінації $R_{\text{скор}}^2$, одержали вираз з урахуванням ступенів вільності:

$$R_{\text{скор}}^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y}_x)^2}{n-m-1} \bigg/ \frac{\sum (y - \bar{y})^2}{n-1}.$$

Відома формула, зв'язку коефіцієнту детермінації та скоригованого коефіцієнту детермінації:

$$R_{\text{скор}}^2 = 1 - (1 + R^2) \cdot \frac{n-1}{n-m-1},$$

де $(n-m-1)$ та $(n-1)$ – ступені вільності чисельника та знаменника залежності; n – кількість спостережень; m – кількість параметрів моделі;

Вірною є нерівність:

$$R_{\text{скор}}^2 \leq R^2$$

Відомо, що значення скоригованого коефіцієнту детермінації не перевищує одиниці:

$$R_{\text{скор}}^2 \leq 1$$

Значення коефіцієнта детермінації коливались від 0 до 1. Чим ближчою є відстань, тим більшою є зміна залежної змінної, що обумовлена зміною незалежної змінної [7].

Як ми бачимо, результати різні за різними методами, іноді дуже відрізняються. Причиною цього є те, що обраний метод не відповідає вихідному зображенню. Тому для кожного аналізованого зразка потрібно вибрати метод, який найкраще підходить нам, залежно від типу та структури (табл. 1). Модуль оцінки ФР дозволяє отримати емпіричні та оціночні криві, а потім чисельно оцінити відхилення.

У модулі обчислення на кожному кроці ітерації метод підсумовує кількість чорних пікселів, що є у вікні облікового запису. За переходу від

однієї фази до іншої, вікно облікового запису буде збільшено. Таким чином можна штучно змінити рівень аналізу зображення.

Отже, ми маємо для кожного методу два змінних елемента відповідно до етапу обчислення (етапу ітерації)

- кількість перелічених елементів (відповідає кількості чорних пікселів у вікні) (N)

- розмір вікна рахунку або елемента довідки (ε).

Тоді ми отримуємо багато точок, які можна представити на декартовій діаграмі. Вісь Y відповідає кількості перелічених елементів (N), а вісь X відповідає розміру вікна обчислення або опорному елементу ε (рис. 4.2), який поступово зростає із збільшенням ε від кроку до кроку.

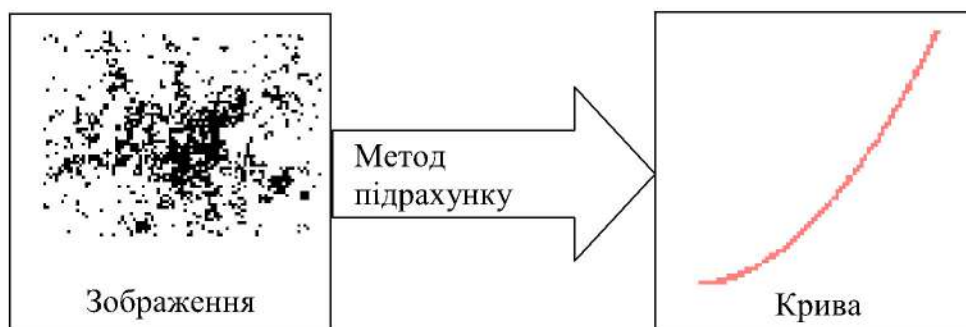


Рис. 4.2. Алгоритм модулю підрахунку ФР

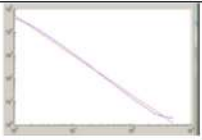
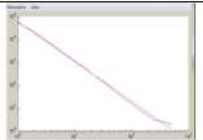
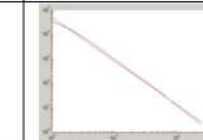
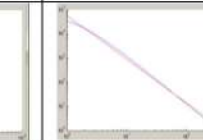
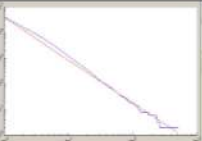

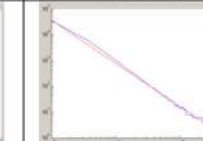
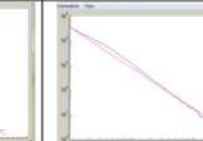
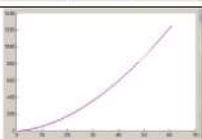

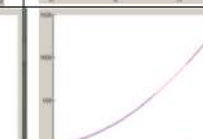


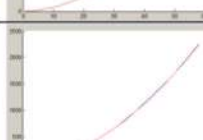
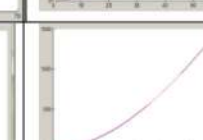
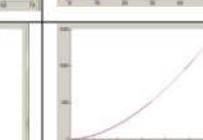
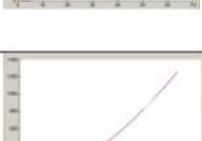
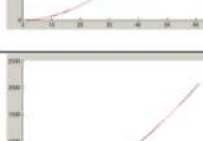
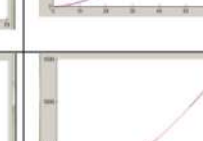
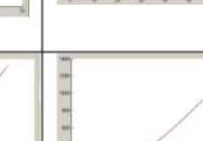


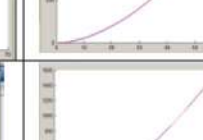
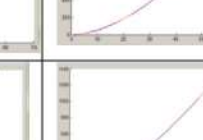
Наступним кроком є порівняння цієї емпіричної кривої на іншій оціночній кривій. Якщо емпірична крива відповідає фрактальному закону, то крива дослідження відповідає за формою параболі або гіперболі то D є ФР:

$$N = \varepsilon^D \text{ або } N = \varepsilon^{-D}$$

У табл. 4.1 узагальнено результати досліджень працездатності методів.

Таблиця 4.1

Емпірична та оцінювальні криві аналізованих методів

Метод	Функції	Досліджуваний зразок			
		1	2	3	4
Сітковий	Експоненціальний, сітковий				
	Лінійний, сітковий				
Кореляцій	Квадратичний				
	Квадратичний, симетричний				
	Квадратичний, білий				
	Квадратичний, внутрішній				

Порівнюючи характеристики методу, характеристики зображення можна зробити висновок, що найпростішим та найдієвішим є метод сіток. Розглядаючи особливості кожного методу обчислення ФР, було вибрано метод, який найкраще підходить для аналізу зображення.

Методи апроксимації експериментальних даних:

Нелінійна регресія

У цьому методі, оцінити емпіричну криву опису структури зображення можливо за 4-ма рівняннями: фрактальним «законом» $N(\varepsilon) = \varepsilon^D$ та трьома

іншими рівняннями, які можуть вимірювати відхилення закону фрактальності:

$$N(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^D$$

$$N(\varepsilon) = \varepsilon^D + c$$

$$N(\varepsilon) = a \cdot \varepsilon^D + c$$

D – ФР;

C – відповідає початковій точці осі Y й називається "фактором форми".

Це комплексний показник локального відхилення від обчисленого фрактального закону. Останнє рівняння використовують за замовчуванням.

Для того, щоб фрактальний аналіз був найкращим підходом, програмне забезпечення може бути оцінено за допомогою двох різних методів. Перший ґрунтується на використанні часткових похідних, водночас інший - на еволюційних стратегіях (тобто генетичних алгоритмах). У більшості випадків два способи дають абсолютно однакові результати.

За замовчуванням використовують метод часткового виведення. Однак можна використати обидва способи. Крім того важливо оцінити похибку обчислень. Це можна зробити за методом найменших квадратів: $f_{err} = (f_{emp} - f_{estim})^2$, проте можна провести нормалізацію найменших квадратів: $f_{err} = (f_{emp} - f_{estim})^2 / f_{emp}^2$, та перевірити за способом "Нормалізованої оцінки".

Логарифмічна регресія (лінійна)

За цього способу криву піддають логарифмічному перетворенню, оскільки степеневий закон описують за лінійним рівнянням:

$$\log(N(\varepsilon)) = \log(\varepsilon^D) \rightarrow \log(N(\varepsilon)) = D \cdot \log(\varepsilon)$$

В програмі застосовують $\log(N(\varepsilon)) = D \cdot \log(\varepsilon) + c$

Слід зазначити, що найкращий метод аналізу зображень - це не один метод, а кілька методів у різних частинах, оскільки структура об'єкта неоднакова і метод обстеження повинен бути різним. Слід підкреслити, що різні способи обчислення ФР зазвичай не дають однакового результату, особливо у разі, якщо об'єкт мультифрактальний.

Якщо знати принципи обчислення цих коефіцієнтів та методів визначення ФР, можна зробити висновки щодо цих методів і виявити причину відмінності результатів.

Для обраного методу результати, отримані методом радіусів мас, відкидаються негайно, оскільки метод може аналізувати лише симетричні зображення, які не відповідають нашим варіантам. Метод ділатації спотворює оригінальне зображення та спрощує вихідні зображення, знижуючи точність та одержані дані. Підводячи підсумок, ми представили два методи розуміння математичних аспектів аналізу.

Метод сіток

Методи на основі ФР є глобальними діагностичними методами, що мали успішне застосування для оцінювання аттракторної розмірності. Вони ґрунтувалися на основі закономірностей розвитку динамічних систем та генерації часових рядів [8]. Розмірність Хаусдорфа D_H ділянки Ω визначали шляхом введення кількостного параметру:

$$\Gamma_H^d(r) = \inf_{s_i} \sum_i (r_i)^d$$

де ділянка Ω вкрита елементами s_i змінного діаметру r_i , а усі діаметри відповідають умові $r_i < r$.

Тобто, шуканою є множина вкритих елементів s_i діаметром, що є менший або рівний r , що мінімізує суму (1). Позначимо її як $\Gamma_H^d(r)$.

d - розмірність міри Хаусдорфа, яку обчислювали як:

$$\Gamma_H^d = \lim_{r \rightarrow 0} \Gamma_H^d(r)$$

d - розмірність міри Хаусдорфа забезпечує узагальнення понять: загальна довжина, площа та об'єм простих множин. Хаусдорф обґрунтував, що Γ_H^d для будь-якої ділянки Ω прямує до $+\infty$, у разі d меншого певного граничного значення D_H ; і жорівнює 0, якщо d є більшим за D_H . Граничне значення D_H називають розмірністю Хаусдорфа для аналізованої ділянки.

Разом з тим, розмірність Хайсдорфа важко обчислювати, тому її заміняють на верхню межу, яка відрізняється лише за певних умов застосування Вох-методу (або ємність Колмогорова) [9].

Розмірність сітки D_B ділянки Ω визначали таким чином: використовували значення $\nu(r)$ - кількісне значення комірок розміром r , необхідних для вкривання області Ω , можна обчислити як:

$$D_B = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(\nu(r))}{\ln\left(\frac{1}{r}\right)}$$

Можна довести, що у разі, обчислення розмірності Хаусдорфа із застосуванням клітин однакового діаметру r , розмірність Хаусдорфа прямує до розмірності Вох-методу.

Відомо низку алгоритмів [10-12], які були розроблені для визначення Вох-обчислень, проте застосування цього методу є прости лише для зображень невеликого розміру. Відомо, що складність обчислень за цим методом значно зростає із збільшенням зображення.

Метод кореляції

Доброю альтернативою вимірюванню методом сіток може бути метод мір кореляції [13]. Завдяки простому порівнянню, величину "кореляції" успішно застосовують для оцінювання розмірів атракторів динамічних систем.

Відповідні розміри визначають за такими принципом: у разі, якщо $\Omega = x_1, x_2, \dots, x_N$ буде сукупністю точок \mathbb{R}^n з множини N то кореляційний інтеграл $C_m(r)$ буде:

$$C_m(r) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{2}{N(N-1)} \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N I(\|x_j - x_i\| \leq r)$$

де I - індикаторна функція ($I(\lambda)=1$).

У разі виконання стану λ , I дорівнює 0, а за інших обставин кореляційна розмірність D ділянки Ω дорівнює:

$$D = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\ln(C_m(r))}{\ln(r)}$$

Актуальність значною мірою залежить від розміру шкали. Це тому, що обидва виміри є різними випадками узагальненого виміру Реньє. Тоді узагальнений інтеграл кореляції C_p :

$$C_p(r) = \frac{1}{N(N-1)^{p-1}} \sum_{i=1}^N \left(\sum_{j \neq i}^N I(\|x_j - x_i\| \leq r) \right)^{p-1}$$

Узагальнену розмірність Реньє D_p визначали як:

$$D_p = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{1}{p-1} \frac{\ln(C_p(r))}{\ln(r)}$$

Можна довести, що розміри бальної шкали та кореляції є сумою [13]. Це також доводить, що "відповідний" вимір є нижньою межею шкали "поля". Через шум при обчисленні фактичних даних різницю між двома вимірами можна ігнорувати.

Тобто обидва обраних нами методи дають правильні оцінки фрактального виміру, а відмінності в даних зумовлені шумом та помилками методів. Оскільки при обчисленні методом комірок обчислюють більше балів і, отже, виявляються більше шуму (у методі кореляції можна розглядати кілька точок одночасно як один елемент обчислення), його похибка є більшою, проте сам метод є простішим.

4.2. Точність обчислення параметрів та принципи її забезпечення

Точність і спосіб оцінювання параметрів дефектів є важливими для цифрового діагностування. Фрактальну розмірність визначали з урахуванням обмеження станів [25]. Допустима ФР $[D]$ за динамічного навантаження епоксикомпозитів, притаманная проведенням випробування повинна, бути нижчою, за критичні значення $D_{cr} = f(\sigma, T)$:







$$[D] \leq \frac{D_{cr}}{n_1},$$







де n_1 коефіцієнт запасу за фрактальністю

З використанням раніше розробленого алгоритму оптико-цифрового аналізу зламів матеріалів, встановлено кількість, виміряно та обчислено параметри поверхні в'язкого відриву сформованих на поверхні руйнування епоксикомпозитів. Визначено значення фрактальності зламів для досліджених схем навантажування зразків, табл. 4.3.

Таблиця 4.3.

Зображення поверхні руйнування епоксикомпозиту з наповнювачем фулерен С60 (дані одержано доц. О.О. Сапроновим та надано для виконання магістерської роботи)

Вміст наповнювача, q , мас.ч.	Енергія, затрачена на руйнування матеріалів, E , Дж	Фрактограми зламу КМ	
-	0,9		
0,010	1,2		
0,025	2,90		

0,050	1,55		
0,075	1,50		
0,100	1,45		

Процес бінаризації - це перетворення кольорового (або в градаціях сірого) зображення в двокольорове чорно-біле. Головним параметром такого перетворення є поріг t - значення, з яким порівнюється яскравість кожного пікселя. За результатами порівняння, пікселю присвоюється значення 0 або 1.

Головна мета бінаризації - це радикальне зменшення кількості інформації, з якою доводиться працювати. Простіше кажучи, вдала бінаризація сильно спрощує подальшу роботу з зображенням. З іншого боку, невдачі в процесі бінаризації можуть привести до спотворень, таких як розриви в лініях, втрата значущих деталей, порушення цілісності об'єктів, поява шуму і непередбачуване спотворення символів через неоднорідність фону.

Інтенсивність — це насиченість певного тону, тобто ступінь візуальної відмінності хроматичного кольору від рівного по світлості ахроматичного (сірого) кольору. Насичений колір можна назвати соковитим, глибоким, менш насичений — приглушеним, наближеним до сірого. У цифрових

технологіях цей параметр кодується за допомогою 8 бітів і, таким чином, може приймати 256 значень — від 0 до 255.

По цьому зображенню ми провели бінаризацію, змінюючи його інтенсивність у межах від 75 до 115, оскільки в цьому діапазоні найкраще відображався розподіл чорних поверхонь по зображенню. Крок «5» зміни інтенсивності є найоптимальнішим, тому що більший крок призвів б до відсутності інформативності, а менший до незначних змін площі чорних поверхонь у зображеннях різної інтенсивності.

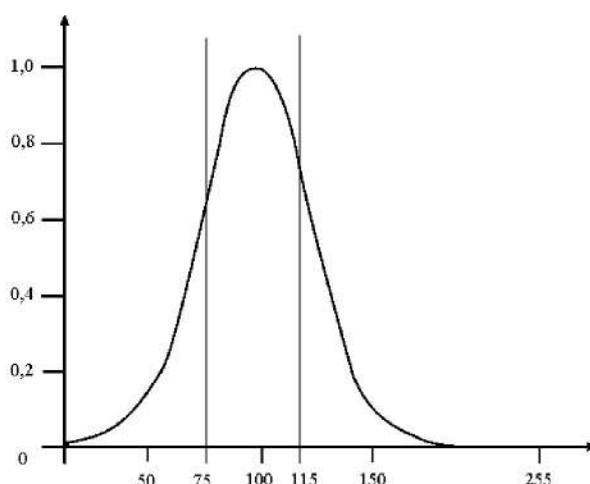
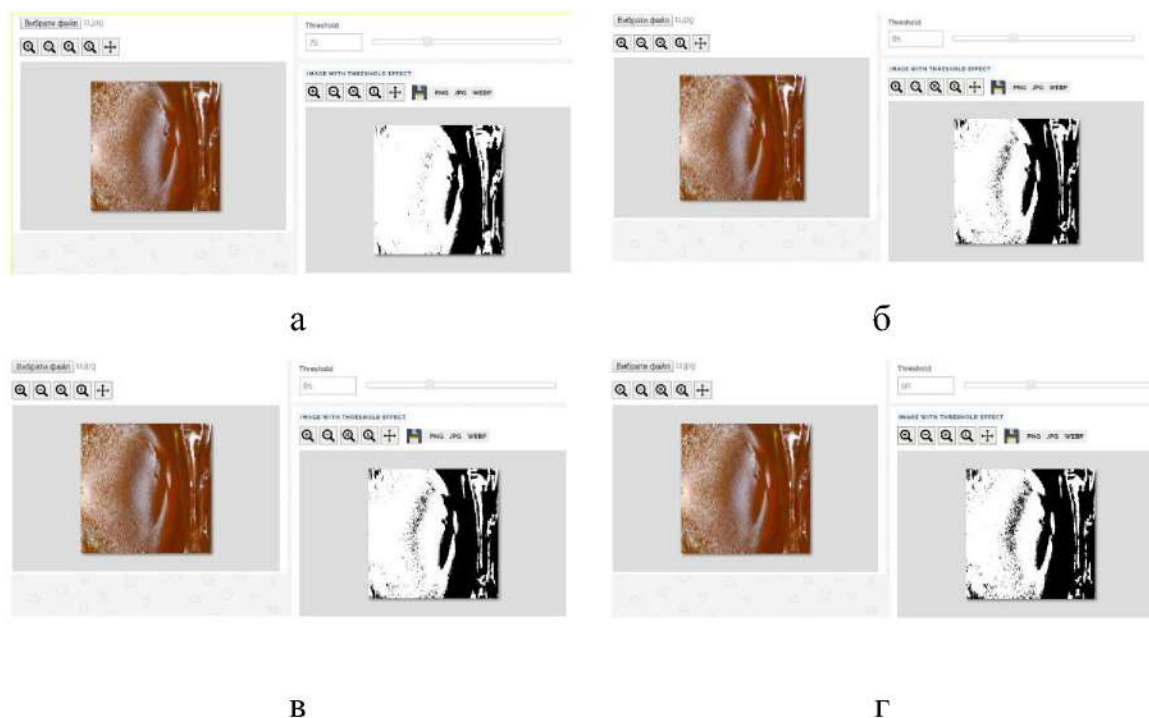
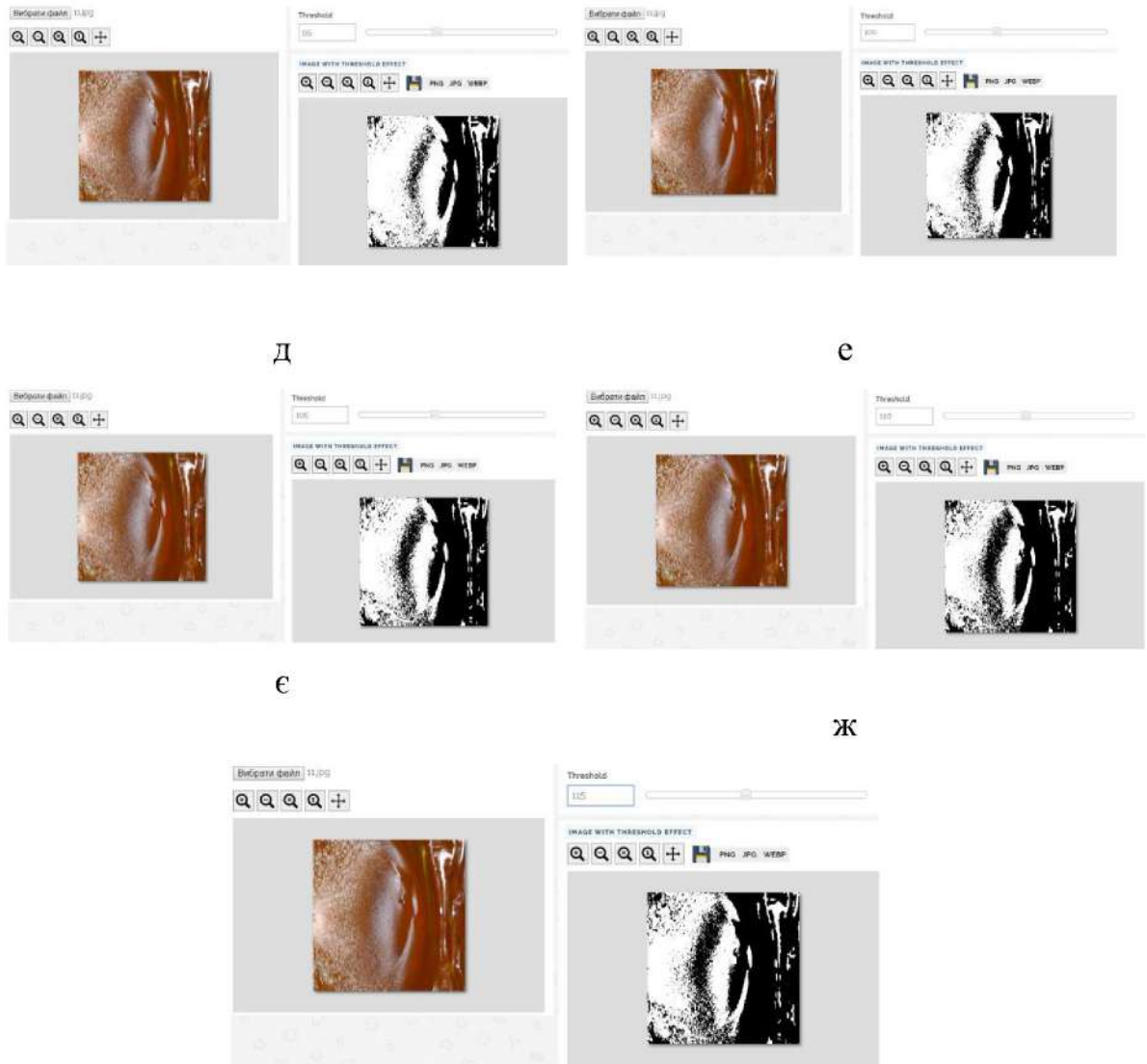


Рис. 4.3. Графік інтенсивності аналізованих зображень.





3

Рис. 4.4. Бінаризовані фотозображення поверхонь руйнування для інтенсивностей $I = 75$ (а); $I = 80$ (б); $I = 85$ (в); $I = 90$ (г); $I = 95$ (д); $I = 100$ (е); $I = 105$ (є); $I = 110$ (ж); $I = 115$ (з);

У епоксикомпозитах, поверхні руйнування зразків у 2-D просторі ніколи будуть однакові, через відмінності в формуванні зв'язків між наповнювачем та епоксидною смолою. Особливо відрізняються ударна вязкість та міцність. Проте, це фрагментований розподіл в межах певного простору не є чисто випадковим, так як фрактальні об'єкти побудовані за принципом центральної організації, самоподібної по всіх просторових

масштабах, яка є властивістю особливо корисною для дослідження. Розповзання моделі, як правило, показує досить неправильну форму, тому необхідно знайти декілька відповідних підходів для опису цієї моделі, за допомогою фрактального дослідження і просторової автокореляції.

4.3. Нові закономірності ударного руйнування

Нерівноважне і хаотичне (саморганізоване) динамічне руйнування епоксикомпозитів формує на поверхні зламу об'єкти з неправильною, нерегулярною формою, що мають фрактальні властивості. Так термодинамічно нерівноважний процес руйнування породжує т.з. сколювання та зумовлює їх самоорганізацію.

Площинну поверхні руйнування прийнято як самостійний об'єкт діагностування, що кількісно відображає мікроскопічну будову зламу. Як зазначає доц. Помулев В.В., цей принцип покладено у основу більшості стандартних методів, наприклад, зеренна структура сталі оцінюється умовними балами залежно від розміру середнього діаметру площинного зерна сталі (ГОСТ 5639-83). Ми у даній магістерській роботі намагаємось перенести та застосувати ці принципи до епоксикомпозитних матеріалів, рис. 4.5.

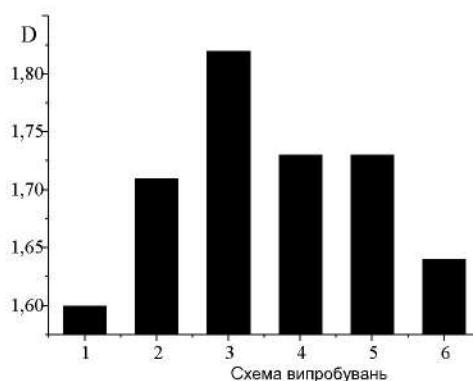


Рис. 4.5. ФР поверхні руйнування композитних матеріалів із частками фулерену C_{60} за схемами випробувань (1-6), проведених доц. О.О. Сапроновим

Сучасний кількісний опис мікромеханізмів руйнування базується на візуальному оцінюванні поверхні зламу, з подальшим підрахунком характеристик таких площа сколів, наявність вязкого руйнування і т.д., при чому абсолютно не враховується а ні їх самоподібність, ані їх іррегулярність та хаотичність. Застосування ФР D для опису структури епоксикомпозитного матеріалу дозволило значно підвищити як якість, так і оперативність аналізу, так одержано закономірності руйнування, рис. 4.5.

Далі за алгоритмом *Box counting* оцінювали фрактальну розмірність мікротекстури зламу епоксикомпозитних зразків. Дані отримані за допомогою методу аналізу оптико-цифрових зображень вказують на монотонно зростаючий характер залежностей E і ФР D . Це дозволяє говорити про можливість створення методик оцінювання (фрактодіагностування) механізмів руйнування епоксикомпозитів по зображенню його поверхні зламу, рис. 4.6.

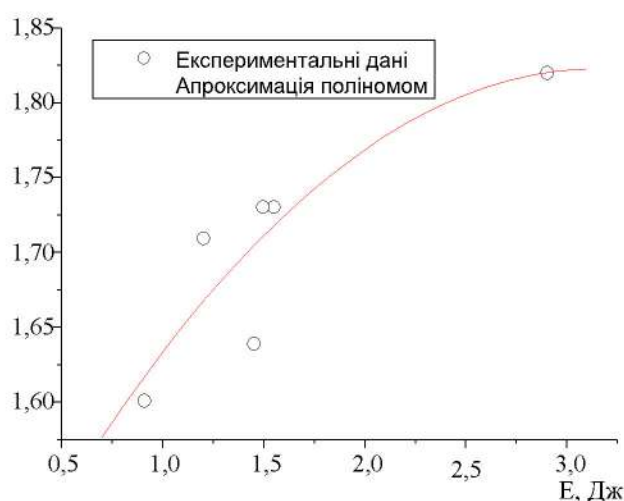


Рис. 4.6. Взаємозв'язок D поверхні руйнування композитних матеріалів із частками фулерену C_{60} за схемами випробувань (1-6), проведених доц. О.О. Сапроновим з енергією ударного руйнування зразків

Таким чином, розроблений в даному підрозділі підхід дозволяє по вхідному зображенню поверхні руйнування епоксикомпозиту, обчислюючи

його фрактальну розмірність D , визначати технологічно важливі геометричні параметри покриття. Зростання ступіня “неоднорідності” або грубості (roughness) поверхні зламу епоксикомпозиту розглядалося, як запорука його вищих властивостей при випробуваннях на удар.

Застосування фрактального підходу дозволило враховувати геометричні особливості топографії зламу, виражені в надмірному зниженні рельєфу зламу певних зонах зразка, які в свою чергу пов'язані з параметрами процесу їх формування. Саме це було теоретично обґрунтовано і підтверджено практично.

Досліджено залежності механічних і технологічних властивостей епоксикомпозитних покриттів від параметрів енергоємності їх руйнування та побудовано математичну (фрактальну) модель, що дозволяє оцінювати властивості покриттів по їх оптико-цифровим зображенням.

Питання дослідження ФР поверхонь руйнування зразків, розглянуте у даній роботі потребує подальшого дослідження, проте одержані результати свідчать, що цей параметр є чутливим до структурно-механічних особливостей матеріалів.

Провівши автоматизований аналіз зображень зламів епоксикомпозитів і проаналізувавши отримані дані встановлено, що ФР є інтегральним параметром механізмів руйнування матеріалів.

Попередні етапи обробки зображення спричиняють значний вплив на кінцевий результат та похибку обчислень. Величина похибки також залежить від методу аналізу та фізичної природи аналізованої поверхні.

Умовно наш графік був розбитий на дві ділянки: на I ділянці вказані межі коректної роботи нашого алгоритму. На II за рахунок «об'єднання» сколів алгоритм працює з похибкою.

ФР дозволяє описати просторові структури руйнування епоксикомпозитів, беручи до уваги геометричні особливості гілкування тріщини під час її поширення за динамічного удару. Оцінка ФР є

інтелектуалізованим способом фрактодіагностування, що розширює можливості оптичного та електронно-мікроскопічного досліджень епоксикомпозитів.

За методами методи фрактальної геометрії проаналізовано морфологічні та геометричні особливості злиття фасеток сколювання, утворених об'єднанням множинних тріщин. Їх площі та лінійні розміри відповідають фрактальним картинам аналізованих зображень, що забезпечує можливість їх співставлення з однотипними даними. Значення D_{cr} знаходиться у межах 0 -2,0. Зокрема, за $D_{cr} < 1,0$ руйнування вважали повністю крихким (нижній ідеалізований стан). У діапазоні значень $1,0 < D_{cr} < 2,0$, зображення містить суміж крихких та вязких механізмів руйнування, які представлені чорними (крихке) та білими (вязке) елементами кластерами.

Такий підхід забезпечує кількісну фрактографію, на відміну від якісної, яка широко застосовується зараз. Він дозволяє оцінити геометричні особливості формування зламу епоксикомпозитних матеріалів сформованих за різних фізико-механічних умов та технологічних модифікацій. Обчислена ФР, він характеризує анізотропію топології поверхні сформованої проростанням магістральної тріщини та злиттям із нею можливих мікротріщини, сформованих у площині зламу.

5. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

5.1. Обґрунтування вибору програмного забезпечення для розрахунків ФР

Фрактальні властивості можуть бути пов'язані з деякими важливими особливостями металічної структури: самоподібність в кластеризації і фрагментація просторових структур в різних масштабах, ієрархія, звивистості меж, і нелінійна динаміка. Таким чином, деякі аспекти дослідження міцності металу знаходяться в повній згоді з фрактальним описом металу і фрактал, як правило, цілком підходить для опису структурних моделей металу.

Фрактальна геометрія стала популярною завдяки роботі математика Мандельброта. Фрактальні заходи вимірювання є хорошим інструментом для глобального порівняння структури металу. У цьому розділі ми дамо більш детальну інформацію про фрактали через опис того, як визначити фрактальну розмірність та площу пошкоджень металу. Методи підрахунку ФР були реалізовані за допомогою програмного забезпечення Fractalyse.

ФР (D) — поняття фрактальної геометрії, що означає статистичну величину, яка говорить про те наскільки повно фрактал заповнює простір, коли збільшувати його до дрібніших деталей.

Fractalyse реалізує різні методи підрахунку для вимірювання ФР, яка відповідає різним розмірам:

1. Grid method.
2. Radius mass method.
3. Dilation method.
4. Correlation method.
5. Gaussian convolution method.
6. Box-counting method.

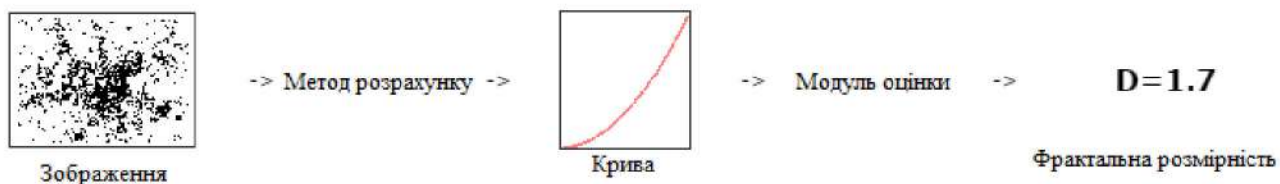
Процес вимірювання розділений на дві частини:

- метод підрахунку;
- модуль оцінки.

Метод підрахунку йде крок за кроком за принципом ітерації. У кожному ітераційному кроці, метод включає в себе підрахунок кількості чорних пікселів, що містяться у вікні підрахунку. Від одного кроку до іншого, розмір вікна рахунку збільшується. При цьому, ми штучно змінили рівень інтенсивності зображення. Таким чином, для кожного методу є два елементи, змінюючись залежно від підрахунку:

1. Число підрахованих елементів (що приблизно рівне числу чорних пікселів, присутніх у вікні) (N).
2. Розмір або вікна рахунку або опорного елемента (ε).

Тоді ми отримаємо ряд точок, які можуть бути представлені на декартовій системі координат. Вісь ординат відповідає числу підрахованих елементів (N), а по осі X відповідає розміру вікна рахунку або до розміру опорного елемента ε , а ε зростає від кроку до кроку.



Математично, модуль оцінки – це ряд точок кривої (названий емпіричною кривою). Наступним етапом є те, щоб ця емпірична крива відповідала іншій, оціненій кривій. Якщо емпірична крива піддається фрактальному закону, то розрахункова крива має вигляд статичної (параболічної або гіперболічної), а D являє собою фрактальну розмірність.

$$N = \varepsilon^D \text{ або } N = \varepsilon^{-D}$$

Grid method (метод сіток).

Це найбільш використовуваний метод оцінки ФР. Зображення вкрите сіткою квадратів і відстань сітки ε різноманітна. За логікою, описаною вище, для кожного значення ε , число квадратів $N(\varepsilon)$, що містить будь-яку заповнену точку, підраховується.

Radius mass method (метод масових радіусів).

Цей метод відноситься до певної точки, відомої як центр підрахунку і дає закон розподілу зайнятих місць навколо цієї точки. Коло обертається навколо цієї точки, а радіус R поступово збільшується. На кожному кроці, загальне число зайнятих точок $N(\varepsilon)$ всередині кола підраховують. У цьому методі, ε дорівнює $2R + 1$.

Dilation method (метод розширення).

Цей метод заснований на алгоритмі Мінковського і Булігана, що дозволяє встановити розмір об'єкта за допомогою теорії міри підходу. У цьому аналізі кожна зайнята точка, оточена квадратом розміру ε , поверхня якого, як вважають, повністю зайнята. Розмір цих квадратів потім поступово розширюється, і ми вимірюємо загальну поверхню $A(\varepsilon)$, розглянуту на кожному етапі. У міру того як квадрати збільшені, будь-які деталі, що менші, ніж ті, що розширюються - пропускаються, і ми поступово отримуємо наближення вихідної форми. Розділивши цю загальну поверхню на поверхні випробувального квадрата (ε^2), отримаємо наближення числа елементів $N(\varepsilon)$, необхідних для покриття цілої поверхні.

Gaussian convolution (метод згортання).

Коли зображення зводиться до однієї кривої, ми можемо застосувати інший метод підрахунку: метод згортання. На противагу іншим методам, Гауссова згортка наноситься на кривій, а не на зображенні. На кожному кроці ітерації, крива стає все більш і більш згладжена. У цьому випадку, структурним елементом (який збільшується на кожному кроці ітерації) є дисперсія функції Гаусса, що використовується для згладжування кривої.

Вісь X являє собою дисперсію Гауссової функції і Y-осі від довжини кривої (вираженої в кількості пікселів), розділена на дисперсії.

Кореляційний метод

У теорії, кореляційна розмірність є мірою розмірності простору, займаного набором випадкових точок, який часто називають типом ФР.

Наприклад, якщо у нас є набір випадкових точок на дійсній числовій прямій від 0 до 1, то кореляційна розмірність буде $\nu = 1$, в той час, якщо вони розподілені по трикутнику вбудованому в тривимірний простір - кореляційна розмірність буде $\nu = 2$. Це те, що ми б інтуїтивно очікували від міри вимірювання. Реальна корисність кореляційної розмірності полягає у визначенні розміру фрактальних об'єктів. Існують і інші методи вимірювання розмірності, але кореляційна розмірність має перевагу, оскільки вона є прямолінійною і швидко обчислюється.

Для будь-якого набору N точок в m - вимірному просторі:

$$\vec{x}(i) = [x_1(i), x_2(i), \dots, x_m(i)], \quad i = 1, 2, \dots, N$$

кореляційний інтеграл $C(\epsilon)$ обчислюється за формулою:

$$C(\epsilon) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{g}{N^2}$$

де g представляє загальне число пар точок, відстань між якими менша, ніж відстань ϵ .

Щодо програми Fractalyse, то обчислення за цим методом здійснюється наступним чином: кожна точка зображення оточена вікном невеликої площі; число зайнятих точок всередині кожного вікна перераховується. Завдяки цьому можна порахувати середнє число точок у вікні того ж заданого розміру. Та ж операція застосовується для вікон зростаючих розмірів. X-вісь графіка представляє розмір бічної сторони вікна підрахунку $\epsilon = (2i + 1)$. Вісь ординат являє собою середнє число підрахованих точок у вікні. В принципі, можна вибрати будь-яку форму для вікна, такі як коло, шестикутник і так далі, проте, так як пікселі є квадратом, то вибір квадрата

допомагає уникнути помилок округлення. Кореляційна розмірність (D_c) показує ступінь однорідності структури металу і він дає докладний результат про розподіл зон сколювання.

Метод Вох.

Цей метод полягає в знаходженні найменшого числа квадрата необхідних для покриття всіх чорних пікселів. Алгоритм сходиться до мінімуму в нескінченному часі, тому результати є лише наближенням кращого висвітлення.

Метод підрахунку Вох, використовується для розрахунку ФР складних об'єктів. Його доцільно використовувати, коли ви не можете розрахувати розмір об'єктів за допомогою числових формул або точно визначити розмірність крутизни неправильної форми. Наприклад, було б важко розрахувати начерки, пил океанських хвиль або хмар з допомогою інших методів. Це пояснює його популярність, незважаючи на обмежену точність своєї лічильної резолюції.

Перевага цього методу в тому, що він простий і адаптується до багатьох ситуацій. Якщо ви можете утримувати об'єкт в межах квадратів або коробки, то ви можете виконати статистичний аналіз, щоб визначити його фізичний вимір. Ви можете використовувати цей метод для розрахунку розмірів для дуже невеликого об'єкта, як пил Кантора або для дуже великого об'єкта, як гірський хребет. В свою чергу недоліком є те, що він дає велику похибку аналізу.

5.2. Обґрунтування вибору методу сіток

Тепер давайте розглянемо, як метод сіток використовується для вимірювання ФР зображення, знайденого в площині.

- По-перше, для кожного розміру захисної сітки, підрахувати число сіток, які містять зображення.

- В даний час пара все комбінації підрахованих значень і помістити їх в стандартному рівнянні для Вох Метод підрахунку.

Розмірність розраховується за рівнянням

$$D_{\text{box}} = \frac{\log n(a) - \log n(b)}{\log(1/s_a) - \log(1/s_b)}$$

Де n число квадратів, що містять зображення, а $1/s$ - масштаб сітки.

Після цього обчислюємо середній результат, щоб отримати точну оцінку об'єктів ФР. Слід зазначити, що в цілому більш тонкі сітки дають більш точний вимірний розмір. Це частково обумовлено кількістю варіацій, які можуть виникнути під час підрахунку регіонів в залежності від того, як сітка поміщається на зображення.

Метод підрахунку площі чорних поверхонь реалізований за допомогою раніше розробленого алгоритму. Підрахунок відбувається крок за кроком за принципом ітерації. У кожному ітераційному кроці, метод включає в себе підрахунок площі чорних поверхонь, яка подавалась у відсотках від всієї площі зображення. Таким чином для цього методу є два елементи, які змінювались залежно від підрахунку:

1. Інтенсивність.
2. F - площа чорних поверхонь у «%».

Зі зміною інтенсивності від 75 до 115 площа чорних поверхонь збільшувалась лінійно все більше і більше від 34% до 68%. Зі збільшенням інтенсивності ріст площі чорних поверхонь не сповільнювався.

За цими даними побудували графік залежності ФР від інтенсивності. На графіку бачимо, що зі збільшенням інтенсивності в межах від 75 до 105 фрактальність зростає, після чого відбувається спад. Це пояснюється тим, що при інтенсивності бінаризованого зображення вище 105 відбувається «об'єднання» чорних поверхонь, що робить неможливим точного визначення реальної фрактальності поверхні епоксикомпозиту. Можна зробити висновок, що алгоритм дає найбільш коректні результати в діапазоні від 75 до 105.

Результати досліджень також показали, що при аналізі поверхонь руйнування епоксикомпозитів, метод сіток має достатню чутливість, є простим й його у подальшому було використано для дослідження і побудови математичних моделей структур зламів епоксикомпозитів.

6. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

6.1. Вдосконалення організації наукових досліджень

Основна мета пошукових прикладних науково-дослідних робіт – знаходження нових шляхів дослідження та створення нової техніки та технології виробництва, практичне застосування досліджуваних явищ та фактів, вони направлені на створення нових технологічних процесів, механізмів, машин, виробів, організаційних та економічних структур, методичних рекомендацій. На стадії виконання пошукових робіт визначається науково – технічний ефект. Вияснюються можливі області застосування результатів в народному господарстві і на основі комплексного якісного аналізу дається характеристика очікуваної технічної та економічної ваги результатів пошукових робіт. При цьому визначається сукупність показників, які змінюються під впливом впровадження результатів робіт, а також можливий діапазон цих змін.

Основні етапи виконання НДР:

- постановка задачі;
- аналіз досліджень по темі;
- розробка теоретичних моделей аналізу фрактографічних зображень;
- розробка методики та проведення експериментальних досліджень;
- уточнення моделей та оптимізація параметрів та режимів роботи;
- розробка систем керування та інших технічних рішень.

Основними напрямками вдосконалення організації наукових досліджень є:

- математичне планування експерименту та скорочення обсягів дослідних робіт;
- розширення області пошуку за рахунок використання нових технічних засобів;
- використання комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизація

процесу вимірювань та скорочення трудоемності і підвищення точності вимірювань;

- розробка подібно-функціональних математичних моделей, реалізація на ПК обчислювального експерименту, що дозволяє уникнути проведення попередніх експериментальних досліджень.

З цією метою для реалізації поставлених задач розроблена програма для реалізації експерименту за ортогональним планом другого порядку, ядром якого є план повнофакторного експерименту типу ПФЕ 2^k , де $k=2$ - кількість факторів. Функція відгуку при цьому шукається у вигляді полінома другого порядку.

Крім цього методика проведення експериментальних досліджень автоматизованого аналізу округлих дефектів на фрактографічних зображеннях передбачала проведення експериментальних досліджень з отримання оптичного зображення мікроскопі МБС-10, який знаходить в ТНТУ і опрацювання вихідних матеріалів за допомогою програмного забезпечення на ПК.

6.2. Планування та розрахунок передвиробничих затрат та капіталовкладень на проведення НДР

При планування затрат на виконання НДР розрізняють передвиробничі затрати $z_{НДР}$ та капіталовкладення $K_{НДР}$.

Передвиробничі затрати складаються із затрат на виконання таких робіт: постановка задач НДР та розробка технічного завдання; теоретичні дослідження та огляд літератури; лабораторні та заводські дослідження; проектування та конструювання виробів, обладнання, оснастки техпроцесів, цехів і т.д., що є об'єктами НДР; виготовлення, випробування та підналадка зразків. Всі розглянуті затрати є поточними затратами для виконання НДР. Проте при визначені капіталовкладень та госпрозрахункового економічного ефекту від впровадження результатів

НДР, виробничі затрати повинні впроваджуватись разом з поточними затратами виробництва нових видів продукції, обладнання і т.д.

Капіталовкладення, які необхідні для виконання НДР, складаються із вкладів в лабораторне обладнання, апарати, прилади з врахуванням затрат на їх проектування та монтаж; в будови та споруди лабораторій, необхідність в яких обумовлена виконанням даної НДР.

Капітальні вклади в НДР складають окремими складовими (додатками) в загальну суму, разом з прямими вкладками в підприємство, що виготовляє продукцію, а також (спряженими і супутніми) вкладками і інші галузі. Їх величина приймається в частині, що відповідає зайнятості обладнання лабораторії, будов та інших засобів на протязі року виконання розглядуваної НДР.

Для визначення передвиробничих (поточних) затрат на виконання НДР складається кошторис затрат, вихідними даними для якого є:

- план проведення НДР;
- розрахунок вартості обладнання для проведення НДР;
- план потреби в основних та допоміжних матеріалах та готових покупних виробках;
- план по праці та заробітній праці.

Для планування праці та заробітної плати на виконання НДР необхідно визначити:

1. Етапи впровадження НДР.
2. Трудомісткість етапів в людино–годинах, людино–днях.
3. Кількість учасників, що виконують роботи по окремих етапах.
4. Тривалість окремих етапів НДР в днях.

Трудомісткість НДР та її окремих етапів визначається за даними НДЧ ТДТУ. На основі трудомісткості встановлюється чисельність робочих, фонд зарплати. Оплата праці науково – технічного персоналу основних лабораторій, проводиться у відповідності із схемою посадових окладів,

затверджених вищестоящою організацією для даного вузу чи НДІ.
Посадовий оклад повинен мати вилку.

Після розрахунку кількості робочих та фонду зарплати слід визначити продуктивність праці (відношення кошторисної вартості робочих до кількості працюючих) та середню зарплату.

1.Розрахунок вартості матеріалів та програмного забезпечення для проведення НДР.

Вартість обладнання:

$$K_{\text{НДР}} = \sum_{i=1}^n K_{\text{НДР}}^i \cdot N_i \cdot \eta_i, \text{ де}$$

n –кількість найменувань обладнання та інших засобів, які застосовуються для виконання НДР;

$K_{\text{НДР}}^i$ –вартість одиниці засобів i -того виду, $\frac{\text{грн}}{\text{од}}$;

N_i –кількість екземплярів i -того засобу, необхідних для виконання дослідження, од ;

η_i –коефіцієнт зайнятості засобу i -того виду на протязі року для виконання даного i -того дослідження.

Оцінювання вартості:

Таблиця 6.3

Вартість матеріалів (за фактичними витратами)					Вартість, грн/кг
№	Назва	Розміри, мм	Кількі сть	Вага, кг	
1	Титановий прут BT-22	100x35	1	0,4383	650
Сумарна вартість матеріалів					290

Таблиця 6.4

Вартість програмного забезпечення			Вартість, грн
№	Назва	Кількість	
1	Adobe Photoshop CS4	1	2435
2	Corel Draw 12	1	2275
3	Origin PRO	1	345
Сумарна вартість			5055

Приймаємо, що ПЗ використовувалось тільки для наших досліджень.

2. Розрахунок витрат на матеріали та напівфабрикати

Розрахунок матеріалів та покупних виробів ведеться виходячи з їх потреби, по нормам витрат та оптово – відпускних цін за одиницю (m, kg).

Для експериментів використовували матеріали: кукурудза; титановий прут розміром 100x35мм, вартість якого $M_M = 290$ грн.

Витрати на допоміжні матеріали M_∂ (канцелярські товари тощо) приймаємо за аналогічними тематиками із розрахунку 20 грн на місяць, звідки

$$M_\partial = 30 \text{ грн.}$$

Загальна вартість матеріалів $M = 290 + 30 = 320$ грн

3. Розрахунок витрат на електроенергію.

Час роботи установки складав безпосередньо 40% ($\psi = 0,6$) від часу проведення експерименту $T_{\Phi AK} = 5$ хв. Середній коефіцієнт навантаження становив $\eta = 0,7$.

Споживна потужність растрового мікроскопа РЭМ-106И становить – 2,5 кВт.

Відповідно витрати на електроенергію становлять $E_N = \psi \eta p_E N T_{\Phi AK}$,

де p_E - ціна електроенергії (за квт год) $p_E = 0,475$ грн.

$$E_N = \psi \eta p_E N T_{\Phi AK} = 0,6 \cdot 0,7 \cdot 0,475 \cdot 2,5 \cdot 5 = 2,494 \text{ грн}$$

Витрати електроенергії на освітлення та комп'ютер $E_O = 0,475 \cdot 75 = 36,6$

грн.

Сумарні витрати на електроенергію:

$$E_{\Sigma} = E_N + E_O = 0,9975 + 36,6 = 39,09 \text{ грн.}$$

4. Розрахунок витрат на заробітну плату

Для визначення загальної тривалості проведення наукових досліджень доцільно дані витрат часу на виконання окремих стадій (етапів) звести у таблицю 6.5.

Таблиця 6.5

Середній час виконання розробки

Номер і назва етапу	Середній час виконання етапу, год.	
	інженер	керівник
Постановка задачі	12	12
Розробка теоретичних моделей аналізу фрактографічних зображень	30	6
Розробка методики та проведення експериментальних досліджень	80	9
Уточнення моделей та оптимізація параметрів та режимів роботи	20	7
Розробка систем керування та інших технічних рішень	32	6
Разом	~174	~40

Основна з/п складається із прямої з/п і доплати, яка при укрупнених розрахунках становить 25 %-35 % від прямої з/п. При розрахунку з/п кількість робочих днів в місяці приймаємо рівною 25,4 дні / міс, що відповідає 203,2 год. / міс. Розмір місячних окладів керівника приймаємо 5000 грн. та інженерів — 1500 грн.

Пряма з/п визначається наступним чином:

$$ЗП = (O_i * T_i) / 203,2,$$

де O_i — розмір місячних окладів 1-х категорій працівників;

T_i — трудомісткість робіт виконаних працівниками /*-х категорій.

Для інженера:

$$ЗП = (1500 * 174) / 203,2 = 1285,7 \text{ (грн.)};$$

Для керівника:

$$ЗП = (5000 * 40) / 203,2 = 984,25 \text{ (грн.)}.$$

Величина доплат визначається наступним чином:

$$ЗП_l = ЗП * K_l,$$

де K_l — коефіцієнт доплат (0,25-0,35).

Приймаємо коефіцієнт доплат рівним 0,3:

для інженера:

$$ЗП_l = 1285,7 * 0,3 = 385,71 \text{ (грн.)};$$

для керівника:

$$ЗП_l = 984,25 * 0,3 = 295,27 \text{ (грн.)};$$

Основна з/п визначається наступним чином:

$$ЗП_o = ЗП + ЗП_l,$$

Для інженера:

$$ЗП_o = 1285,7 + 385,71 = 1671,41 \text{ (грн.)};$$

Для керівника:

$$ЗП_o = 984,25 + 295,27 = 1279,52 \text{ (грн.)}.$$

Величина додаткової з/п визначається наступним чином:

$$ЗП_d = ЗП_o * K_d,$$

де K_d — коефіцієнт додаткової з/п (0,05-0,1).

Приймаємо коефіцієнт додаткової з/п рівним 0,1, тоді:

для інженера:

$$ЗП_d = 1671,41 * 0,1 = 167,14 \text{ (грн.)};$$

для керівника:

$$ЗП_d = 1279,52 * 0,1 = 127,95 \text{ (грн.)}.$$

Витрати, на проведення розробки програмного продукту крім річного фонду заробітної плати включають ще й соціальні нарахування.

Нормативи нарахувань на заробітну плату наступні:

- фонд страхування від безробіття – 1,3%;
- пенсійний фонд – 31,8%;
- фонд соціального страхування – 2,9%;
- фонд соціального страхування від нещасних випадків і професійних захворювань 1%.

Всього норматив нарахувань на заробітну плату інженера становить 37%:

$$1838,41 \cdot 0,37 = 680,21 \text{ (грн.)},$$

а для керівника 37 % :

$$1407,47 \cdot 0,37 = 520,76 \text{ (грн.)}.$$

Таким чином, результати розрахунку заробітної плати та нарахувань на неї зведемо в таблицю 6.6.

Таблиця 6.6.

Зведена відомість витрат на заробітну плату, грн.

	Категорія працівників	Основна заробітна плата, грн.			Додаткова заробітна плата	Нарахування на заробітну плату	Всього витрат на заробітну
		Пряма заробітна плата	Доплати	Всього			
1	Інженер	1285,7	385,71	1671,4 1	167,14	680,21	2519,11
2	Керівник	984,25	295,27	1279,5 2	127,95	520,76	1928,23
	Всього	2269,95	680,98	2950,9 3	295,09	1200,97	4447,34

Загальновиробничі витрати при укрупнених розрахунках приймаємо на рівні 80 % від суми основної і додаткової з/п інженера, яка була нарахована за роботу по проведенні досліджень. Аналогічно визначаються адміністративні витрати, які доцільно прийняти на рівні 50 % від суми основної і додаткової з/п інженера. Позавиробничі витрати приймаємо на рівні 5 % від виробничої собівартості.

Розрахунок поточних витрат на проведення розробки програмного продукту зведемо в таблицю 6.7.

Таблиця 6.7 – Калькуляція собівартості проведення НДР (розробки програмного продукту)

Статті витрат	Витрати, грн.	В % до загальної суми, %
1. Основна заробітна плата	2950,93	22,97
2. Додаткова заробітна плата	295,09	2,3
3. Нарахування на заробітну плату	1200,97	9,35
4. Консультації	25,00	0,19
5. Матеріали	320,00	2,49
6. Електроенергія	39,09	0,30
7. Витрати на ПЗ	5055,00	39,36
Загальновиробничі витрати	1470,84	11,45
Разом виробнича собівартість	11356,92	88,42
7. Адміністративні витрати	919,27	7,16
8. Позавиробничі витрати	567,85	4,42
Повна собівартість	12844,04	100

5. Розрахунок ціни розробки і економічна ефективність від використання програмного продукту.

Ціну розробки науково-дослідного продукту можна визначити

$$C = (C_{np} / N_z + C_{kon}) + P$$

де C_{np} — собівартість розробки програмного продукту), грн.;

N_z — кількість замовлень, од.;

C_{kon} — собівартість копіювання (ксерокопії, дискети, компакт-диски, поштові витрати, відрядження спеціалістів для запуску та наладки програмного забезпечення тощо), грн.;

P — нормативна величина прибутку (15 % - 30 % від собівартості C_{np}).

Нехай собівартість копіювання програмного продукту становитиме 10 грн. Прийнемо нормативну величину прибутку рівною 20 % від собівартості. Таким чином ціна розробки програмного продукту складатиме:

$$C = (12844,04 / 1 + 10) + 2568,81 = 15422,85$$

Отже ціна розробки програмного продукту дорівнює 15422,85грн.

7. ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

7.1. Правила техніки безпеки при роботі в лабораторіях

У лабораторному приміщенні мають місце шкідливі і небезпечні чинники першою і четвертої групи.

Фізичні небезпечні й шкідливі виробничі чинники.

- 1) Підвищений рівень шуму, відповідно до ГОСТу 12.1.003-83 [30], джерелами якого є друкуючі пристрої і установки кондиціонування. Вплив шуму на організм людини призводить до зниження гостроти зору, зорової адаптації, порушує сприйняття зорової інформації та знижує продуктивності праці на 30-60%.
- 2) Підвищена температура довкілля, виникає й унаслідок одночасної роботи обчислювальної техніки і освітлювальних установок, які значну частину споживаної електроенергії перетворюють в теплову. Вплив цього чинника на організм людини призводить до зайвим затратам енергії нормалізацію теплового балансу, наслідком є відчуття дискомфорту й відповідне зниження працездатності.
- 3) Підвищене значення напруги в електричному ланцюгу, замикання якого може статися через людину. Це може призвести до електроудару, який впливає на організм людини біологічно (роздратування і порушення нервових і м'язових тканин) і механічно (розриви шкірного покриву, вивихи).
- 4) Недостатня освітленість робочої зони, причиною якої може бути широкий діапазон зміни і мінливість природного світла, неправильний вибір штучного освітлення і їхнього розташування. Цей чинник викликає стомлення очей, зниження працездатності, можуть призвести до патологічному погіршення зору людини.

5) Відсутність чи недолік природного світла, причиною його можуть стати такі джерела: площа і орієнтація вікон, ступінь чистоти скла вікон, забарвлення стін приміщення. Природне освітлення має важливе значення для працюючих. З іншого боку, природне освітлення має і психологічну дію, створюючи для працюючих відчуття безпосереднього зв'язку з його оточенням.

6) Підвищений рівень електромагнітних випромінювань, джерелом якого є електронно-променеві трубки моніторів ЕОМ. Вплив цього чинника на організм людини призводить до захворювань нервової системи, раку.

7) Психофізіологічні шкідливі чинники. Джерелами фізіопсихологічного чинника є нерациональна організація робочого місця, напруженість праці.

Усі ці фактори сприяють зміни в людини функціонального стану центральної нервової системи [30], нервово-м'язового апарату рук (під час роботи з клавіатурою введення інформації):

- розумова перенапруга;
- перенапруження зорових аналізаторів;
- монотонність праці;
- емоційні перевантаження;
- статичні перевантаження.

7.2. Санітарно-гігієнічні вимоги у лабораторному приміщенні

Виробнича санітарія – система організаційних, гігієнічних і санітарно-технічних заходів і засобів [32], які запобігають дії на робітників виробничих факторів.

Виробнича санітарія включає оздоровлення повітряного середовища і нормалізацію параметрів мікроклімату в робочій зоні, захист працюючих від шуму, вібрації, ультразвуку і електромагнітних випромінювань; забезпечення потрібних нормативів природного і штучного освітлення;

підтримання у відповідності з санітарними вимогами території підприємства, основних виробничих і допоміжних приміщень [32]. Основними санітарно-технічними системами забезпечення потрібних умов праці у даному випадку є: система вентиляції і кондиціонування повітря, система опалення, освітлення виробничих приміщень. В розливочному цеху встановлена система приточно-витяжної вентиляції. Опалення цеху парове. Подача тепла здійснюється від загальнозаводської котельні.

Вимоги до освітлення

Основні вимоги охорони праці до освітленості такі. Освітленість повинна бути достатньою і відповідати характеру зорових робіт. Освітленість повинна бути рівномірною без різких тіней. Між об'єктом розрізнення і фоном, на якому розглядається об'єкт, повинна бути деяка контрастність [32]. Джерело світла не повинно осліпляти працюючого. Рівень освітленості робочих поверхонь повинен бути постійним в часі і мати оптимальний спектральний склад світла. Електроосвітлювальні пристрої повинні бути безпечними при експлуатації.

$$P = P_{\text{нм}} \cdot S_n / n = 15 \cdot 900 / 150 = 90 \text{ Вт}.$$

Протипожежні заходи

Будівлі та їх частини у яких розміщені ЕОМ, повинні мати не нижче II ступінь вогнестійкості. Пожежі помешкань з ЕОМ представляють собою особливо небезпечні ситуації, так як пов'язані з великими матеріальними втратами. Пожежа може виникнути при взаємодії горючих речовин [31].

Можливі причини виникнення пожежі у приміщенні роботи програмістів і операторів ЕОМ:

- а) недотримання правил експлуатації електронно-обчислювальної техніки;
- б) недотримання правил пожежної безпеки;
- в) перегрів розеток та частин обладнання перехідного опору у місцях сполук;

р) несправність загального чи місцевого освітлення робочих місць.

Горючими компонентами у приміщенні є:

- а) віконні рами, двері, робочі столи;
- б) книжки, довідники-роздруківки програм, інші робочі матеріали;
- в) розчинники, мастила та інші пожежонебезпечні речовини, які періодично йдуть на проведення ремонтних і профілактичних робіт на встановленому у приміщенні устаткуванні.

Джерелами виникнення пожежі є:

- а) елементи електропроводки, що потенційно можуть перегріватись внаслідок несправності устаткування чи порушення правил експлуатації устаткування;
- б) устаткування, встановлене у приміщенні.

Щоб запобігти пожежі необхідно проводити ряд технічних і організаційних заходів у відповідність до ГОСТ 12.1.004 – 91 і ГОСТ 12.4.009 – 83.

У системі запобігання пожежі передбачити:

Встановлюють 1 вогнегасник на $40 - 50 \text{ м}^2$ [31], але не менше двох у приміщенні. У приміщенні де, проводяться роботи, пов'язані зі створенням автоматизованої системи збирання та опрацювання інформації необхідно встановити 2 вогнегасника ЗУ – 5;

- а) ящик з піском обсягом $0,5 \text{ м}^3$;
- б) систему з автоматичною пожежною сигналізацією з датчиками, що реагують на поява диму ФНП – 1 з розрахунку 1 на 10 м^2 ;
- в) телефон, встановлений у легкодоступному місці.

Організаційно-технічні заходи щодо пожежної безпеки містять у собі такі положення:

- а) включення питань пожежної профілактики в усі інструктажі технічної безпеки;
- б) заборона паління в неналежному місці;

- в) призначення відповідального за пожежну безпеку;
- г) контроль ізоляції і реальний стан електропроводки з періодичністю 1 раз на рік.

8. ЕКОЛОГІЯ

8.1. Актуальність охорони навколишнього середовища.

У зв'язку з бурхливим розвитком промисловості останнім часом гостро постало питання про екологію та захист навколишнього середовища [33]. Одним з найбільших джерел забруднення природи є легка промисловість, зокрема металургійна [33].

В умовах інтенсивного розвитку всіх галузей легкої промисловості спостерігається значне погіршення стану довкілля. Ця ситуація виникла в результаті значних викидів шкідливих речовин в навколишнє середовище. Особливо небезпечними є канцерогенні речовини, які повільно накопичуються у організмі людини і з часом можуть призвести до захворювання. У процесі матеріального виробництва, на жаль, неможливо уникнути утворення деяких побічних шкідливих рідин, газів, твердих тіл, тому проходить забруднення природних сфер різними шкідливими і токсичними речовинами [38]. Це викликає необхідність розробки заходів по попередньому знешкодженню шкідливих речовин у викидах і підтримування їх у межах, дозволених гранично допустимих концентрацій.

Як такого, цілком безвідходного виробництва в техногенних системах у чистому вигляді не зустрічається; усе одно є відходи енергії, тверді і рідкі відходи, що запинаються в процесі їхньої переробки [34].

З метою економії матеріальних ресурсів величезне значення має використання відходів виробництва, що при сучасних технологіях утворюються в усе зростаючих обсягах.

Ця проблема також має екологічне значення.

Всі виробництва, де утворюються відходи [35], варто поділити на 2 групи:

- виробництва з перевагою механічної обробки вихідної сировини і матеріалів, тобто без руйнації їхньої внутрішньої структури (металообробка, лісова, деревообробна і легка промисловість). Результатами такого виробництва є товарна продукція й відходи.

- виробництва з комплексною переробкою сировини, у яких в результаті фізико-хімічної переробки, окрім основної продукції, утворюються побічні продукти і відходи виробництва. До таких виробництв відносяться нафтохімія і нафтопереробка, хімічна і коксохімічна промисловість, чорна і кольорова металургія.

Різноманітного вигляду відходи утворюються не тільки в процесі матеріального виробництва, але й у сфері виробничого і побутового споживання.

Погіршення стану навколишнього природного середовища призводить до погіршення стану здоров'я населення і вимагає додаткових асигнувань держави на охорону здоров'я. Тому для захисту довкілля на законодавчому рівні 25 червня 1991 року було видано Закон України "Про охорону навколишнього природного середовища" [37]. В ньому говориться про потребу і обов'язковість екологічної експертизи у всіх видах діяльності. Завдання екологічної експертизи полягає у виявленні екологічної небезпеки на всіх підприємствах, яка може повести за собою небажані наслідки для довкілля. Тому на підприємствах з шкідливими викидами встановлюються очисні споруди і пристрої, які попередньо очищають стічні води чи гази, які викидаються в навколишнє середовище [37].

8.2. Забруднення довкілля, що виникають у результаті реалізації дипломного проекту

Сучасна структура промислового виробництва в Україні характеризується високою питомою вагою ресурсо- та енергоємних

технологій. Значні масштаби ресурсокористування економіки України спричиняють високі обсяги щорічного утворення та нагромадження твердих відходів виробництва і споживання [36].

Основними джерелами утворення твердих відходів в Україні залишаються підприємства гірничорудного, хімічного, металургійного, машинобудівного, паливно-енергетичного та будівельного комплексів, які займають і будуть займати в найближчій перспективі провідне місце в структурі національної економіки.

Металургійна промисловість об'єднує підприємства, які послідовно здійснюють видобування, збагачення, металургійну переробку руд чорних і кольорових металів та нерудної сировини, виробництво чавуну, сталі, кольорових і дорогоцінних металів, сплавів, прокатне виробництво, переробку вторинної сировини (металобрухту)[36]. Основною споживачою продукцією металургійної промисловості є машинобудування, будівництво, транспорт.

Серед проблем, пов'язаних із розвитком кольорової металургії, найголовнішими є забруднення повітря, нагромадження великої кількості порід, некомплектне використання сировини.

Використання людиною в повсякденній діяльності цих речовин та їх сполук неминуче веде до їх появи у відходах її життєдіяльності.

Відходи – це будь-які речовини, матеріали і предмети, що утворилися в процесі людської діяльності і не мають подальшого використання за місцем утворення чи виявлення та яких власник повинен позбутися шляхом утилізації чи видалення [38].

Відходи класифікують:

- за агрегатним станом відходів;
- за властивостями;
- за походженням;
- за джерелами забруднення.

За агрегатним станом відходи поділяють на:

- тверді;
- рідкі;
- газоподібні.

Відходи за властивостями поділяють на наступні категорії(класи):

- малонебезпечні;
- помірнонебезпечні;
- високонебезпечні;
- надзвичайно небезпечні.

Відходи за походженням ділять на наступні види:

- промислові;
- сільськогосподарські;
- побутові;
- військові.

Відходи за джерелами забруднення ділять на наступні види:

- фізичні відходи: шум, ультразвук, вібрацію, випромінювання, електрохімічні поля, тощо.
- хімічні відходи: хімічні речовини та їх сполуки, що утворюються в процесах виробничої та інших видів діяльності, які підлягають утилізації та подальшій переробці.
- біологічні відходи: антибіотики, шкідливі мікроорганізми, віруси, гриби, спори рослин, тощо.

8.3. Заходи зі зменшення забруднення довкілля

Заходи по захисту навколишнього природного середовища для проектуємих, а також для діючих підприємств містять комплекс засобів, які визначаються системою державних законодавчих актів[35], в відповідності з якими комплекс захисних засобів по попередженню забруднень атмосфери

викидами підприємств включає архітектурно-планувальні, конструктивно-технологічні засоби розсіювання викидів через високі димові труби, очистку вентиляційного повітря, димових і технологічних газів перед викидом в атмосферу, контроль забруднення атмосфери викидами.

Конструктивно технологічні засоби включають розробку і застосування технологій, які забезпечують максимальне використання сировини, проміжних продуктів і відходів виробництва по принципу безвідходної або маловідходної технології.

Важливе значення для забезпечення потрібних санітарно – гігієнічних нормативів повітряного середовища має правильне планування промислової площадки.

Одним з важливих конструктивно – технологічних засобів зменшення забруднення довкілля для підприємств харчової промисловості є рекуперація тепла в результаті використання вторинних енергетичних ресурсів, значна частина яких витрачається, збільшуючи теплове забруднення навколишнього середовища.

Санітарно-технічні заходи включають очистку вентиляційного повітря від шкідливих речовин, утилізацію і знешкодження відходів.

Ефективне вирішення екологічних проблем пов'язаних з ліквідацією чи обмеженням негативного впливу твердих відходів на довкілля та здоров'я людей можливе тільки на основі послідовної реалізації Законів України [38]. «Про охорону навколишнього природного середовища», «Про відходи», «Про забезпечення санітарного та епідеміологічного благополуччя населення», Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження порядку розроблення, затвердження і перегляду лімітів на утворення та розміщення відходів» та інших нормативно-правових актів, державних стандартів України з охорони навколишнього природного середовища, санітарних норм і правил та інших документів.

Це привело до екологічної паспортизації підприємств, установ, організацій, реєстрації та паспортизації джерел забруднення довкілля та опосередкованого впливу їх на здоров'я людей, введення єдиного державного класифікатора твердих відходів [38]. А головне, до формування державних принципів вирішення проблеми твердих відходів на сучасному етапі являються:

- пріоритетний захист навколишнього природного середовища та здоров'я людей від негативного впливу твердих відходів;
- забезпечення ощадливого використання матеріально-сировинних ресурсів;
- економія енергоресурсів ;
- науково обгрунтоване узгодження екологічних, економічних та соціальних інтересів суспільства щодо утворення твердих відходів та поводження з ними;
- поступова мінімізація виробництва твердих відходів, особливо високотоксичних;
- здійснення державного обліку твердих відходів щодо їх утворення та розміщення;
- здійснення загальнодержавного контролю та моніторингу за місцями і об'єктами утворення та розміщення твердих відходів для запобігання їх шкідливого впливу на довкілля та здоров'я людей.

Для ефективної роботи очисних споруд і повітроочисного обладнання необхідно постійно контролювати якість їх роботи і оперативно усувати недоліки, розробляти і вдосконалювати конструкції діючих установок.

ВИСНОВКИ

Фрактальний вимір - це математично відомий параметр з багатьма унікальними властивостями, які дуже корисні для практичних застосувань у фізичних дослідженнях. Зокрема, цей параметр важливий при вивченні геометрії поверхні епоксикомпозитів досліджених на ударну вязкість. ФР не є випадковою змінною, а відображає властивості топографії поверхні та основні властивості об'єкта дослідження.

Розробка комп'ютерно-інтелектуалізованого методу оцінювання стійкості до руйнування композитів на основі фрактального аналізу значно спростила б процес аналізу прототипів покриттів, прискоривши процес аналізу. Наразі наявні програми не можуть повністю задовольнити потреби користувачів, оскільки для складного аналізу зазвичай не потрібна одна програма, а набір програм, який може містити навіть п'ять і більше диференційованих додатків або одного програмного продукту. У нашому випадку дослідження вимагало програми для бінаризації зображення зламу поверхні епоксикомпозитів та програми фрактального аналізу злімів зразків епоксикомпозитів.

ФР характеризує структуру та розвинутість поверхні пошкодження, або руйнування [40, 41]. При «чистому» ФР невелика, із збільшенням шорсткості поверхні вона зростає. Енергоємність руйнування епоксикомпозитів пов'язана з фрактальною розмірністю поверхні.

Розроблені методи є корисними для проектування полімеркомпозиційних захисних покриттів із самоорганізуючою структурою на основі урахування закономірностей фізико-хімічних процесів при формування епоксикомпозитних матеріалів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНІ ЛІТЕРАТУРИ

1. Erdem S., Blankson M.A. Fractal-fracture analysis and characterization of impact-fractured surfaces in different types of concrete using digital image analysis and 3D nanomap laser profilometry // Construction and Building Materials. – 2013. – 40. – P. 70-76.
2. Yining Ding, Wei Zeng, Qing Wang, Yulin Zhang Topographical analysis of fractured surface roughness of macro fiber reinforced concrete and its correlation with flexural toughness // Construction and Building Materials. - 2020. - VOL. 235, 117466
3. Hao-Liang Wu, Jing Yu, Duo Zhang, Jun-Xing Zheng, Victor C. Li Effect of morphological parameters of natural sand on mechanical properties of engineered cementitious composites // Cement and Concrete Composites. - 2019. - Vol. 100. - P. 108-119.
4. Campos K.A.D., Augusto J., Pereira T.A., Hein L.R.D.O. 3-D reconstruction by extended depth-of-field in failure analysis - Case study II: Fractal analysis of interlaminar fracture in carbon/epoxy composites // Engineering Failure Analysis. - 2012. - 25. - P. 271-279.
5. Fractal analysis at varying locations on clinically failed zirconia implants. Academy of dental materials / K.S. Jodha, S.M. Salazar Marocho, S.S. Scherrer, Y. duan, J.A. Griggs // Nürnberg, Germany, Dent Mater, 33 (2017), Article e87.
6. Griggs J.A. Using fractal geometry to examine failed implants and prostheses // Dental Materials. – 2018. – Vol. 34. – P. 1748-1755.
7. Yuxuan Xia, Jianchao Cai, Edmund Perfect, Wei Wei, Qi Zhang, Qingbang Meng Fractal dimension, lacunarity and succolarity analyses on CT images of reservoir rocks for permeability prediction // Journal of Hydrology. – 2019. – Vol. 579, 124198

8. Fredrick M. Mwema, Esther T. Akinlabi, Oluseyi P. Oladijo Fractal analysis of hillocks: a case of rf sputtered aluminum thin films // Applied Surface Science. – 2019. – vol. 489, p. 614-623.
9. H. Fu, W. Wang, H. Zhao, F. Jin, J. Li, Study of hydrogen-induced delayed fracture in high-Mn TWIP/TRIP steels during in situ electrochemical hydrogen-charging: role of microstructure and strain rate in crack initiation and propagation, Corros. Sci. (2019) 108191, <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108191>
10. Panigrahy C., Seal A., Mahato N.K. Quantitative texture measurement of gray-scale images: fractal dimension using an improved differential box counting method, Measurement. – 2019. – 147, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.106859>.
11. Ana Horovistiz, Susana Laranjeira, J. Paulo Davim 3-D reconstruction by extended depth-of-field in tribological analysis: Fractal approach of sliding surface in Polyamide 66 with glass fiber reinforcement // Polymer Testing. – 2019. – Vol. 73. – P. 178-185.
12. Baer J.U., Kent T.F., Anderson S.H. Image analysis and fractal geometry to characterize soil desiccation cracks // Geoderma. – 2009. – Vol. 154 (1-2). – P. 153-163.
13. Цыганков В.Н., Гончаров А.И. Вычисление фрактальной размерности при обработке изображений цифровой субтракционной ангиографии // Медицинская визуализация. – 2014. - №1. – С. 118-123.
14. Фрактальні слайни в задачах багатомасштабного аналізу і синтезу часових рядів: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.23 / О. Б. Новікова; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Львів, 2014. - 20 с.
15. Мельник Г.М., Березький О.М., Батько Ю.М., Комп'ютерна система аналізу біомедичних зображень // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Комп'ютер-ні науки та інформаційні технології. - 2009. - № 650. - С. 11-18.

16. Потапов А.А., Герман В.А. Методы фрактальной обработки слабых сигналов и малоконтрастных изображений // Автометрия. - 2006. - Т. 42, № 5. С. 3 – 25.
17. Б. Мандельброт. Фрактальная геометрия природы. – М.: Институт компьютерных исследований, 2002 г. - 656 с.
18. Никулин Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики- СПб.:БХВПетербург, 2003. - 560 с.
19. Б. Мандельброт. Фракталы, случай и финансы. – М.: Регулярная и хаотическая динамика, 2004 г. - 256 с.
20. Федер Е. Фракталы. - М.: Мир, 1991. — 254 с.
21. Э. Петерс. Хаос и порядок на рынках капитала. Новый аналитический взгляд на циклы, цены и изменчивость рынка: Пер. с англ. - М.: Мир. 2000. -333 с.
22. Иванов С.А. Стохастические фракталы в Информатике // Научно-техническая информация. - Сер. 2. - 2002. - № 8. - С. 7–18.
22. Van Raan A.F.J. Fractal geometry of Information Space as Represented by Cocitation Clustering // Scientometrics. -1991. - Vol. 20, N 3. - P. 439–449.
23. Усов В. В., Шкатуляк Н. М. Фрактальна природа крихких зламів металлу // Фіз.-хім. механіка матеріалів. - 2005. - 41, № 1. - С. 58–63.
24. Klonowski, W. (2000). Signal and image analysis using chaos theory and fractalgeometry.Machine Graphics & Vision, 9(1/2), 403–431.
25. Розроблення автоматизованого методу оцінювання руйнування композитних матеріалів за даними фрактального аналізу: Кваліфікаційна робота магістра за спеціальністю „8.05010201 - Автоматизоване управління технологічними процесами " / В. П. Козак, О. П. Попадюк; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. - Тернопіль: ТНТУ, 2017 р. - 11 с.
26. Батько Ю. М. Аналіз цитологічних зображень в системах автоматизованої мікроскопії: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.23 -

- Системи та засоби штучного інтелекту / Ю. М. Батько; Нац. ун-т "Львів. політехніка". - Л., 2013. - 20 с.
27. Максименко О., Франкевич Л., Сахарук О. Алгоритм обробки цифрових зображень для визначення деформаційних характеристик матеріалів // Електроніка та інформаційні технології. - 2013. - Випуск 3. - С. 156-168.
28. Никитин О.Р., Кисляков А.Н. Комплексирование многоспектральных изображений с использованием методов морфологического анализа и цветового кодирования // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. - 2012. - № 4. - С. 52–57.
29. Шуплецов Ю.В., Ампилова Н.Б. Алгоритм вычисления размерности Минковского для полутоновых изображений // Известия Российского государственного педагогического университета им. Герцена. - 2014. - № 165. - С. 99-106.
30. Кисляков А.Н. Фрактальный метод идентификации личности по цифровым изображениям отпечатков пальцев // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы XII Международной научно-технической конференции. Владимир, 2017. - С. 200–204.
31. Розробка полімеркомпозиційних захисних покриттів із самоорганізуючою структурою [Текст]: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.02.01 / Букетов Андрій Вікторович ; Луцький держ. технічний ун-т. - Луцьк, 2001. - 20 с.
32. Фізико-хімічні процеси при формування епоксикомпозитних матеріалів [Текст] / А. В. Букетов [и др.]; Тернопільський держ. технічний ун-т ім. Івана Пулюя. - Тернопіль: Збруч, 2005. - 182 с.
33. Ідентифікація і моделювання технологічних об'єктів та систем [Текст] / А. Букетов ; Тернопільський держ. технічний ун-т ім. Івана Пулюя. - Тернопіль: Тайп, 2009. - 260 с.

34. Відновлення засобів транспорту фулереновмісними епоксикомпозитами [Текст]: монографія / [А. В. Букетов та ін.] ; Херсон. держ. мор. акад. - Херсон : ХДМА, 2018. - 161 с.
35.
https://web.posibnyky.vntu.edu.ua/fksa/2kvetnyj_komp'yuterne_modelyuvannya_system_procesiv/t2/217..htm
36. Нич Л.Я., Камінський Р.М Визначення показника Герста за допомогою фрактальної розмірності, обчисленої клітинковим методом на прикладі коротких часових рядів // Інформаційні системи та мережі. – 2015. – №814. - С. 100 - 111.
37. Гогіташвілі Г. Г., Карчевські Є.-Т., Лапін В. М. Управління охороною праці та ризиком за міжнародними стандартами: Навч. посіб. - К.: Знання, 2007. - 367 с.
38. Жидецький В.Ц. Основи охорони праці: підруч. / В. Ц. Жидецький. - 3-тє вид., перероб. і доп. - Львів: Укр. акад. друкарства, 2006. - 336 с.
39. Основи охорони праці в підрозділах МНС України : навч. посіб. / В. А. Батлук, Б. О. Білінський, В. В. Ковалишин, О. Л. Мірус; М-во освіти і науки, молоді та спорту України. - Л.: Афіша, 2011. - 505 с.
40. Дослідження точності фрактальної апроксимації структури деталей із композитних матеріалів. / В.В. Ванін, О.В. Залевська / Прикладна геометрія, дизайн та об'єкти інтелектуальної власності: матеріали II-ї міжнародної науковопрактичної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. – К.: КНУБА, 2013 – С.69-72.
41. Моделирование процесса диагностики заболеваний аденомы ушной зоны методом фрактальной геометрии / В.В. Ванин, О.В. Залевская / Научный обозреватель. Научноаналитический журнал – №10(34) – 2013. – С.76-80.