

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії

(назва факультету)

Кафедра автоматизації технологічних процесів та виробництв

(повна назва кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(освітній рівень)

Автоматизоване класифікування дефектів підшипників ковзання на основі багатомасштабного цифрового аналізу їх робочих поверхонь (комплексна тема)

Виконавли: студенти 4 курсу, групи КАс-41

Спеціальність 174

“Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка”

(шифр і назва спеціальності)

Крушельницький Ігор
Володимирович

(підпис)

(прізвище та ініціали)
Сарабун Сергій
Михайлович

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Керівник

Марущак П.О.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Нормоконтроль

Козбур І.Р.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Рецензент

Стухляк П.Д.

(підпис)

(прізвище та ініціали)

м. Тернопіль – 2026

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництва
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2026р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Крушельницькому Ігорю Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизоване класифікування дефектів підшипників ковзання на основі багатомасштабного цифрового аналізу їх робочих поверхонь (комплексна тема)

Керівник роботи д.т.н., проф. Марущак П.О.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджена наказом ректора від « 14 » травня 2026 року № 4/9-231

2. Термін подання студентом завершеної роботи 25 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи ДСТУ 3012-95 Підшипники кочення та ковзання. Терміни та визначення

ДСТУ ISO 4383:2015 Підшипники ковзання. Багатошарові матеріали для тонкостінних підшипників ковзання (ISO 4383:2012, IDT)

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Аналітична частина;

2) Проектна частина;

3) Спеціальна частина;

4) Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Презентація кваліфікаційної роботи аркушів формату А4

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Спеціальна частина</i>	<i>проф. Марущак П.О.</i>		
<i>Безпека життєдіяльності,</i>	<i>доц. Сенчишин В.С.</i>		
<i>основи хорони праці</i>			

7. Дата видачі завдання

« 20 p.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент _____
(підпис)

Крушельницький І.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____
(підпис)

Марущак П.О.
(прізвище та ініціали)

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництва
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« » 2026р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Сарабуну Сергію Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизоване класифікування дефектів підшипників ковзання на основі багатомасштабного цифрового аналізу їх робочих поверхонь (комплексна тема)

Керівник роботи д.т.н., проф., Марущак П.О.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджена наказом ректора від « 14 » травня 2026 року № 4/9-231

2. Термін подання студентом завершеної роботи 25 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи ДСТУ 3012-95 Підшипники кочення та ковзання. Терміни та визначення

ДСТУ ISO 4383:2015 Підшипники ковзання. Багатошарові матеріали для тонкостінних підшипників ковзання (ISO 4383:2012, IDT)

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Аналітична частина;

2) Проектна частина;

3) Спеціальна частина;

4) Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Презентація кваліфікаційної роботи аркушів формату А4

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Спеціальна частина</i>	<i>проф. Марущак П.О.</i>		
<i>Безпека життєдіяльності, основи хорони праці</i>	<i>доц. Сенчишин В.С.</i>		

7. Дата видачі завдання

« _____ » _____ 20 _____ p.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

[illegible]

Студент

(підпис)

Сарабун С.М.

(прізвище та ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Марущак П.О.

(прізвище та ініціали)

А н о т а ц і я

Крушельницький Ігор Володимирович, Сарабун Сергій Михайлович – Автоматизоване класифікування дефектів підшипників ковзання на основі багатомасштабного цифрового аналізу їх робочих поверхонь (комплексна тема).

В кваліфікаційній роботі використані такі терміни: аналіз поверхні, зношування, багатомасштабність, аналіз зображення, фрактал.

Об'єктом дослідження є процес фрактодіагностики вкладишів автомобілів, автоматизованим аналізом зображень.

Мета роботи – автоматизоване класифікування дефектів підшипників ковзання на основі аналізу зношеної поверхні.

У цій кваліфікаційній роботі розглянуто фрактальні характеристики поверхонь тертя як засіб для опису та кількісної оцінки нерегулярних, складних явищ зношування. У ній описується важливий зв'язок між параметрами профілю та шорсткістю поверхні, що дають площу поверхні нерегулярних поверхонь руйнування. У статті розглянуто експериментальні процедури, необхідні для отримання зображень зношених ділянок вкладишів підшипників ковзання, та проведені вимірювання.

Крім того, у роботі представлені фрактальні рівняння, які лінеаризують усі експериментальні дані та забезпечують постійні фрактальні розмірності.

Серія експериментів з автоматизованого визначення фрактальної розмірності поверхні вкладишів підшипників ковзання підтверджує застосовність таких методів для діагностування граничного стану та встановлення причин пошкодження. Обчислені фрактальні розмірності, що виникають у результаті цих аналізів, мають певну спільність для досліджених поверхонь та їхніх профілів.

Загалом, вищу розмірність спостерігали у зразках, що зазнали динамічного продавлювання та зсуву, порівняно зі зразками, які руйнувалися під час стирання. У кваліфікаційній роботі запропоновано заходи з охорони праці. Це дає змогу підвищити безпеку праці, попередити виробничий травматизм і професійні захворювання.

Krushelnysky, Igor Volodymyrovych, Sarabun, Sergey Mikhailovich – Automated classification of defects in sliding bearings based on multi-scale digital analysis of their working surfaces (complex topic).

The following terms are used in the qualification work: surface analysis, wear, multi-scale, image analysis, fractal.

The study's objective is the fractal diagnostics of automobile liners using automated image analysis.

The purpose of the work is to automate the classification of defects in sliding bearings based on analysis of the worn surface. This qualification work considers the fractal characteristics of friction surfaces as a means of describing and quantifying irregular, complex wear phenomena. It describes an important relationship between profile parameters and surface roughness, which give the surface area of irregular fracture surfaces. The article discusses the experimental procedures necessary to obtain images of worn areas of plain bearing liners, and measurements are made.

In addition, the work presents fractal equations that linearize all experimental data and provide constant fractal dimensions.

A series of experiments to automate the determination of the fractal dimension of the surface of plain bearing liners confirms the applicability of such methods for diagnosing the limit state and identifying the causes of damage. The calculated fractal dimensions obtained from these analyses show a common pattern across the studied surfaces and their profiles.

In general, a higher dimension was observed in samples subjected to dynamic pressing and shearing than in samples destroyed by abrasion. Occupational safety measures are proposed in the qualification work. This makes it possible to increase occupational safety, prevent industrial injuries and occupational diseases.

ЗМІСТ

ВСТУП	9
1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	
1.1. Характеристика конструкцій підшипників ковзання	11
1.2. Закономірності зношення вкладишів колінвалу автомобілів	18
1.3. Аналізу текстури цифрових зображень пошкодженої поверхні	23
2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ	
2.1. Фрактальність як міра впорядкованості систем	28
2.2. Методи цифрового моніторингу стану поверхонь матеріалів і деталей	30
2.3. Технологічні аспекти аналізу зображень зношеної поверхні	47
3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	
3.1. Багатомасштабність як основа фрактодіагностування	54
3.2. Визначення фрактальної розмірності і площі ділянок зношування поверхні підшипників ковзання	60
4. БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	78
ВИСНОВКИ	82
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	83

ВСТУП

Оптичний контроль підшипників ковзання (опор, де тертя відбувається під час ковзання поверхонь) включає методи візуального та приладового огляду для виявлення зносу, задирів, тріщин і руйнувань антифрикційного шару. Він є ключовим етапом неруйнівного контролю, який запобігає аварійним зупинкам механізмів

Підшипники ковзання, або опорні підшипники, складаються з вала або опорної шипки, яка вільно обертається в опорній металевій втулці або корпусі. У цих підшипниках немає тіл кочення. Їхня конструкція та будівництво можуть бути відносно простими, але теорія та робота цих підшипників можуть бути складними [1–6].

ISO 15243: 2017 класифікує типи пошкоджень, що виникають після встановлення підшипника у вузол/обладнання та під час експлуатації, за винятком дефектів виробництва, таких як відсутність деталей. Типи пошкоджень за ISO поділяються на шість категорій: контактна втома, знос, корозія, електрична ерозія, пластичні вириви та тріщини й сколювання (рис. 1).

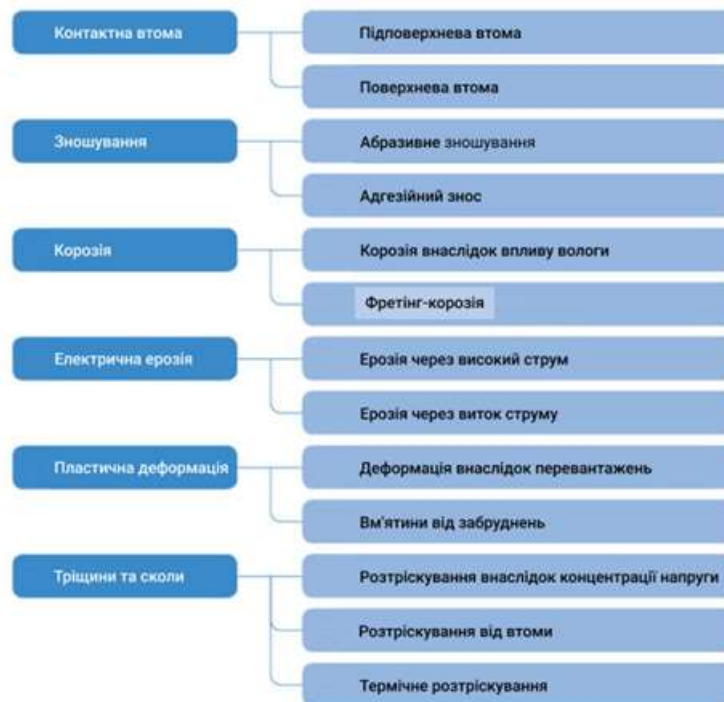


Рис. 1. Класифікація типів пошкоджень згідно з ISO 15243: 2017.

Для більш точної класифікації типів пошкоджень кожна з цих категорій включає кілька підкатегорій [7–11]. Дослідження підшипників ковзання є критично важливим для підвищення їхньої довговічності, енергоефективності та стійкості до зношування. Основною метою є запобігання аваріям, зниження тертя у вузлах та створення нових композитних матеріалів і методів змащування для екстремальних умов експлуатації, тому розроблення нових методів і конструкцій підшипників ковзання є вкрай важливим.

Добре відомо, що поверхні тертя твердих тіл не є ідеально плоскими і мають фрактальну розмірність. Експерименти з дослідження фрактальної розмірності поверхонь тертя були проведені для широкого спектру матеріалів, що зазнають як крихкої, так і пластичного деформування та руйнування. Такий масштабно-інваріантний стан поверхонь руйнування дозволяє припускати, що ці поверхні з'явилися в результаті дії універсального механізму руйнування і цим механізмом є нелінійна динаміка, проте практичні закономірності цього припущення потребують подальшого вивчення, чому й присвячено цю бакалаврську кваліфікаційну роботу [12–16].

1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Характеристика конструкцій підшипників ковзання

Відомі рідинно-плівкові підшипники ковзання, що змащуються рідким або консистентним мастилом.

Відомі також:

- тихошвидкісні штифти та втулки – це тип підшипника ковзання, в якому вал або корпус зазвичай не здійснює повного оберту. Часткове обертання за низької швидкості, зазвичай перед зміною напрямку обертання, не забезпечує утворення повної плівки рідини, і тому всередині підшипника виникає контакт металу з металом. Штифти та втулки постійно працюють у режимі граничного змащування. Цей тип підшипників змащують мастилом для екстремальних тисків, щоб допомогти витримувати навантаження. До складу мастила додають твердий дисульфід молібдену для підвищення його тримкої здатності. Багато важконавантаженого технологічного обладнання містить штифти й втулки. Тому ударні навантаження, а також забруднення водою та брудом, часто є основними факторами їхнього пошкодження [17–22].

Сухі підшипники ковзання містять вал, що обертається в сухій втулці, зазвичай з полімеру, який може бути змішаний з твердими речовинами, такими як молібден, графіт, PTFE або нейлон. Обмеження застосування цих підшипників полягає в експлуатації за низьких навантажень і низьких поверхневих швидкостей.

Напівзмащувані підшипники ковзання складаються з обертового вала, що обертається в пористій металевій втулці зі спеченої бронзи або алюмінію, у якій мастило міститься в порах металу. Ці підшипники експлуатують за низьких навантажень, низьких і середніх швидкостей та температур до 100 °C.

Підшипники з поворотними або нахиленими колодками складаються з вала, що обертається в оболонці, сформованій вигнутими колодками. Кожна колодка здатна обертатися незалежно та вирівнюватися з кривизною вала. Перевагою такої конструкції є точніше вирівнювання опорної оболонки відносно обертового вала та підвищення її стабільності.

До підшипників ковзання належать втулкові, ковзаючі, вкладишні та бабітові підшипники. Термін "бабіт" насправді застосовують до шарів м'якших металів (свинцю, олова та міді), які утворюють металеву контактну поверхню вкладиша підшипника. Ці м'якші метали покривають міцніший сталевий опорний вкладиш і є необхідними для пом'якшення ударів вкладиша від твердого обертового валу [23–26].

Прості корпусні підшипники ковзання сприймають лише радіальне навантаження, перпендикулярне до валу, зазвичай через спрямовану вниз вагу або навантаження на вал. Опорні або осьові навантаження вздовж осі валу також можуть сприйматися опорними підшипниками ковзання, розробленими для цієї мети. На рис. 1 показано конструкцію вкладиша з шаруватою будовою, в якій підкладка, що містить міцний підкладковий матеріал, покрита одним або кількома шарами, що мають бажані трибологічні властивості, щоб забезпечити поверхню підшипника, яка звернена до взаємодіючої рухомої частини, наприклад, шийки колінчастого вала, під час використання. У відомих вкладишах підшипників міцним підкладковим матеріалом може бути сталь товщиною близько 1 мм або більше. Відомий підкладковий шар може бути матеріалом на основі міді (наприклад, мідно-олов'яна бронза) або матеріалом на основі алюмінію (наприклад, алюміній або алюмінієво-олов'яний сплав), який приклеюється до основи (або безпосередньо до основи, або до додаткового проміжного шару). Товщина підкладкового шару зазвичай знаходиться в діапазоні від приблизно 0,05 до 0,5 мм (наприклад, 300 мкм сплаву на основі міді, що складається з 8% мас. Sn, 1% мас. Ni та решти Cu, за винятком випадкових домішок) [27–29]. Шар верхнього шару може становити 6–25 мкм пластикового композитного шару на основі полімеру або шару металевого сплаву (наприклад, сплаву на основі олова).

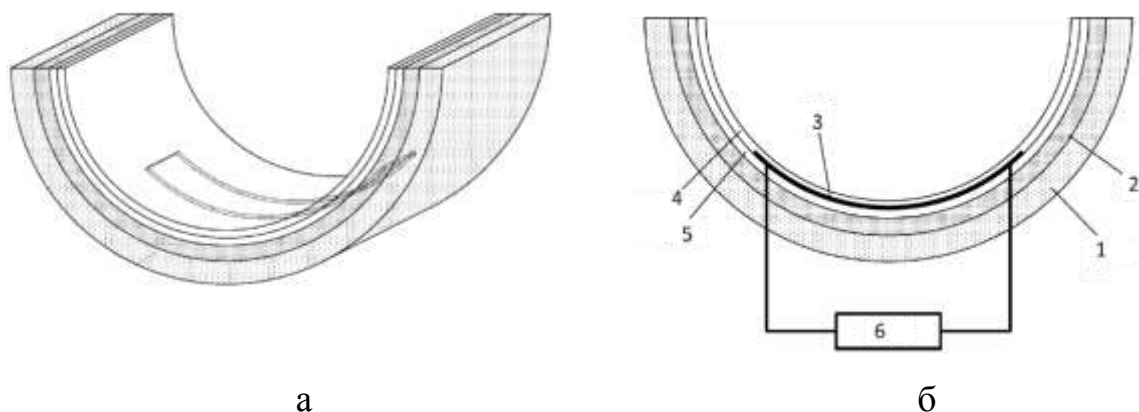


Рис. 1.1. Багатошаровий підшипник ковзання, патент EP3045749A1, 2019: а – загальний вигляд; б -

На Рис. 1.1, показано схему корпусу підшипника 1 з резистором 3, електрично з'єднаним з модулем моніторингу 6. Під час використання модуль моніторингу 6 вимірює опір резистора 3. Після того, як верхній шар покриття 4 стерся, резистор 3 почне зношуватися. За виміряним електричним опором резистора 3 модуль моніторингу 6 може визначити, чи повністю зносилася частина резистора 3, як показано на рис. 1б, що зумовило порушення безперервності електричного кола. Модуль моніторингу 6 може вмикати сигналізацію та/або деактивувати роботу двигуна, якщо виявить, що другий шар покриття 4 зношується.

Крім того, у випадку, якщо резистор 3 товстий, його електричний опір змінюється з часом зношення. Перевагою є те, що моніторинг електричного опору резистора 3 дозволяє визначати рівень зносу покриття 6 з більшою чутливістю, що дозволяє модулю моніторингу видавати різні рівні сигналізації (наприклад, жовтий та червоний попереджувальні сигнали), що відповідають різним рівням зносу покриття.

Слід відзначити, що підшипники ковзання працюють у граничному режимі (контакт метал-метал) лише під час запуску та зупинки обладнання, коли швидкість обертання вала (шийки) недостатня для формування масляної плівки [30–34]. Саме під час запуску та зупинки є найбільший ризик пошкодження підшипника.

Гідростатична підйомна сила, створена зовнішньою подачею оливи під

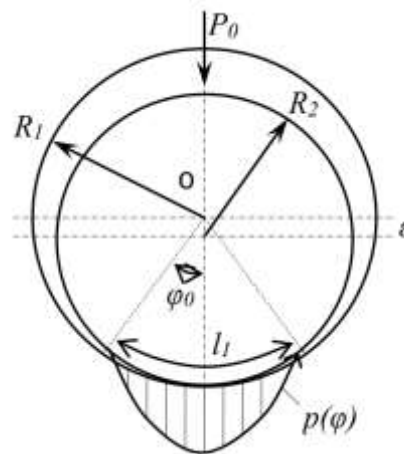
тиском, може бути використана для вирівнювання великих, важких шийок перед запуском (обертанням вала) з метою запобігання цьому типу пошкодження. Під час нормальної роботи вал обертається з достатньою швидкістю, щоб проштовхувати оливу між відповідними вигнутими поверхнями вала та корпусу, створюючи таким чином масляний клин та гідродинамічну масляну плівку [35–39].

Ця повна гідродинамічна плівка рідини дозволяє цим підшипникам витримувати надзвичайно важкі навантаження та працювати з високими швидкостями обертання. Робочі швидкості обертання на поверхні становлять 175-250 м/с. Температури часто обмежуються використанням мастилом, оскільки свинцево-олов'яний бабіт здатний витримувати температури до 150°C.

Відомий патент КНР, CN119737389A, 2025 який забезпечує текстуру поверхні в зоні масляної плівки на внутрішній поверхні втулки магнітно-рідинного підшипника, завдяки чому текстура поверхні еквівалентна багатьом мікрогідродинамічним підшипникам, безпосередньо забезпечуючи додаткову опорну силу для шийки та значно підвищуючи ефективність змащування та несучу здатність магнітно-рідинного підшипника ковзання ; водночас, шляхом встановлення нижньої поверхні текстури поверхні як похилої площини, взаємодія між текстурою поверхні та клиноподібним гідродинамічним ефектом, що виникає під час обертання шийки , розумно посилюється [40–43]. Гідродинамічні ефекти цих двох накладаються один на одного, утворюючи синергетичний ефект змащування, що значно оптимізує стан змащування магнітно-рідинного підшипника , особливо в умовах високого навантаження.



а



б

9

Рис. 1.2. Тривимірної моделі структури (а)поверхні текстури в області тиску масляної плівки втулки підшипника, що пропонується патентом КНР, CN119737389A, 2025 та

розрахункова схема підшипника ковзання: P_0 – навантаження на одиницю довжини; R_1, R_2 – радіуси відповідно вкладиша та валу; ε – радіальний зазор; $2\varphi_0$ – кут обхвату; l_1 – шлях тертя вкладиша за один оберт; $p(\varphi)$ – функція розподілу контактного тиску.

Цей тип системи складається з трьох основних компонентів: нерухомої частини або підшипника, рухомої частини або цапфи та мастила. Металеві компоненти системи можуть виготовлятися з різних матеріалів [44–47]. Підшипник зазвичай виготовляється з м'якшого металу, ніж цапфа, щоб запобігти зносу рухомого елемента.

Наразі методи зміцнення підшипників ковзання включають переважно нанесення поверхневої плівки, використання нових матеріалів для підшипників, полірування та вдосконалені процеси термічної обробки, але всі вони мають певні недоліки. Хоча метод нанесення поверхневої плівки може покращити міцність підшипника ковзання, він не може гарантувати зменшення зносу підшипника ковзання під час робочого процесу [48–51]. Використання нових матеріалів для підшипників, ймовірно, збільшить витрати на

обробку підшипника . На процес полірування впливають властивості матеріалу та точність обробки, а шорсткість поверхні підшипника завжди обмежена після обробки.

Обробка текстури на внутрішній поверхні підшипника ковзання може певною мірою вирішити вищезазначені проблеми, але в попередньому рівні техніки текстура переважно формується лазерною обробкою або травленням [48–51]. Для обробки криволінійних деталей великого розміру ці два рішення мають певні труднощі.

Метою винаходу, рис. 1.3 є створення пристрою та способу обробки текстури внутрішньої поверхні підшипника ковзання. Шляхом створення текстури, подібної до риб'ячої луски, на поверхні вкладиша підшипника ковзання забезпечували багатоступеневий збіжний масляний клин. Це технічне рішення забезпечило формування масляної плівки під час запуску, збільшило товщину масляної плівки, захистило робочу поверхню, зменшило силу тертя підшипника ковзання під час роботи, покращило динамічні характеристики змащування під тиском і тим самим збільшило термін служби підшипника ковзання .

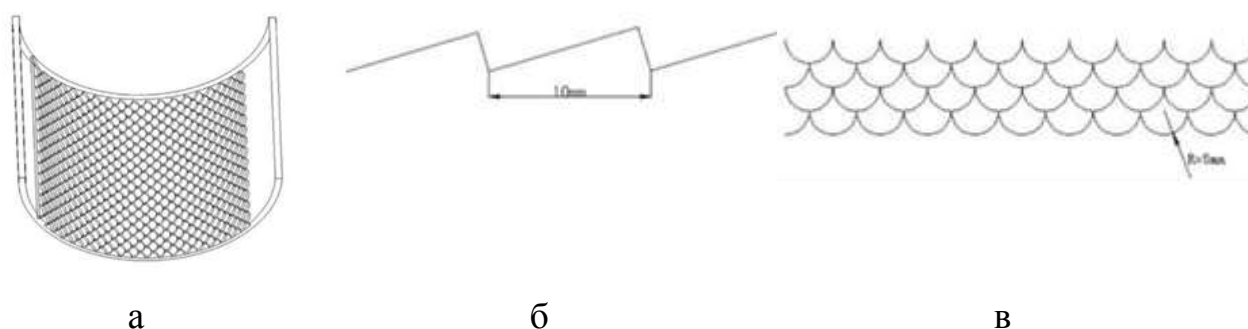


Рис. 1.3. Схема текстури для підшипника ковзання морського дизельного двигуна: а - розріз текстури у формі риб'ячої луски в глибинному напрямку; б - вигляд зверху.

Відомий програмний пакет ARMD здатний сприяти комплексному оцінюванню підшипників із рідинною плівкою. Практично будь-який підшипник або підшипникову систему, доступну в галузі, можна проаналізувати за допомогою одного з модулів рішення для підшипників. Можна створити повні прогнози продуктивності гідродинамічних,

гідростатичних та гібридних змащених опорних, конічних та упорних підшипників, що працюють у ламінарному та/або турбулентному режимах, рис. 1.4.

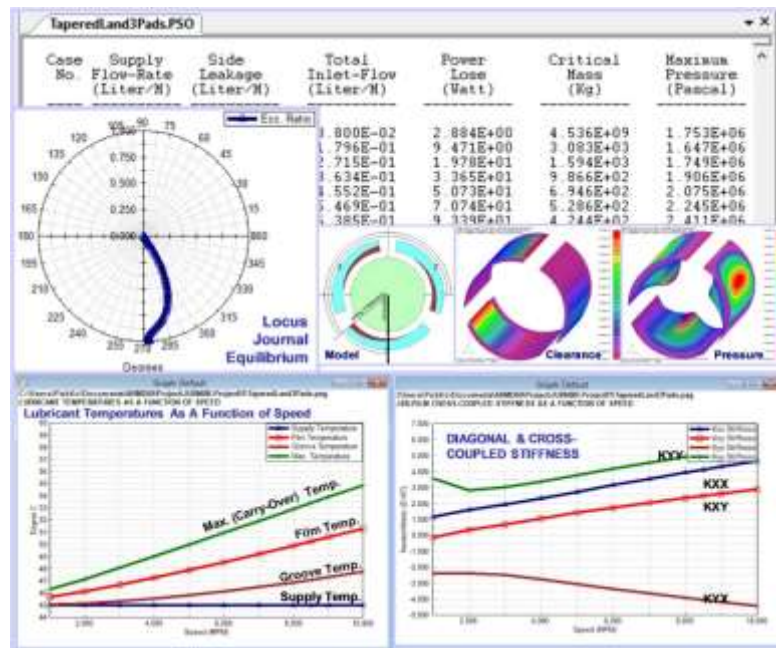


Рис. 1.4. Програмний пакет ARMD для розрахунку параметрів вкладишів підшипників ковзання, <https://www.rbts.com/ARMDFluidFilmBearings.html>

У змащуванні підшипників ковзання застосовуються три основні режими: гідродинамічний (повна плівка), змішаний (плівка) та граничний. Важливо зазначити, що незалежно від того, наскільки добре оброблена металева поверхня, дефекти все одно існують. Ці невеликі піки та западини відомі як нерівності. Три режими змащування, стосуються ступеня контакту між цими нерівностями.

Мастило потрапляє в підшипник з центру та проходить до кінців, де виходить з підшипника. Мастило виконує кілька функцій, зокрема контролює тертя, знос, корозію, температуру та забруднення, а також є компонентом передавання потужності, тому результати, отримані за допомогою модулів підшипників рідинної плівки, враховують:

- вантажопідйомність / положення цапфи або бігунка
- кут орієнтації;
- мінімальна товщина плівки;

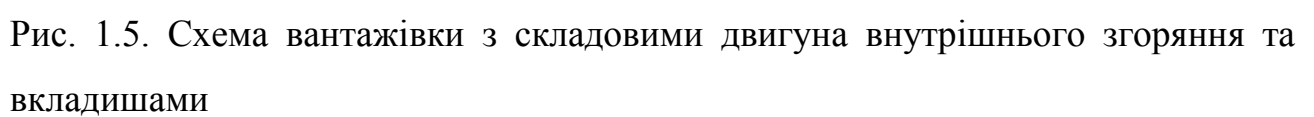
- втрата потужності через в'язкість;
- вирівнювальні моменти;
- вимоги до потоку;
- стабільність (вир підшипника);
- коефіцієнти пружин та демпфування;
- розподіл зазору та тиску;
- тиск та витрати в заглибленні;
- тепловий баланс і підвищення температури для підшипникової системи та окремих колодок.

Можливості моделювання з використанням пакет ARMD враховують: кавітація, перекіс, межі під тиском, система подачі мастила через канавки під тиском, система подачі через сопла під тиском, відхилення поверхні/структури та схема подачі мастила (JURNBR, HYBCBR) із заданим тиском або обмежувачами (капілярний, діафрагмовий або регулювальний клапан потоку), геометрією канавок та фасками.

1.2. Закономірності зношення вкладишів колінвалу автомобілів

У галузі двигунів та їхніх складових, таких як двигуни внутрішнього згоряння, і зокрема дизельні двигуни, є зростаючий попит на зниження споживання палива шляхом підвищення ефективності складових, що складають двигун внутрішнього згоряння.

Один із факторів, що має особливо важливе значення для забезпечення зниження споживання палива, пов'язаний із втратами на тертя в двигуні, тобто втратами потужності, що долають тертя між сполученими поверхнями, і пов'язаними з ним втратами на зсув у різних контактуючих середовищах. Зазвичай у двигуні існує щонайменше два типи тертя: механічне тертя, спричинене механічним контактом, зазвичай граничним, та гідродинамічне (або в'язке) тертя, спричинене зсувом оливи. Більшість модифікацій двигуна, пов'язаних зі зменшенням втрат на тертя, лише вирішують проблему



Сучасні дослідження спрямовані на зменшення гідродинамічних втрат на тертя без збільшення механічних втрат. Значна частина загальних втрат на тертя в двигунах властива підшипниковим вузлам ковзання, таким як підшипники ковзання, корінні підшипники або шатунні підшипники транспортного засобу. Наприклад, для ефективної роботи підшипників ковзання рідка плівка мастила повинна розділяти поверхні тертя. Однією з важливих функцій в'язкої рідини є забезпечення захисту рухомих частин, тим самим зменшуючи тертя та зношення. В'язка рідина зазвичай також може сприяти охолодженню, видаленню відкладень і запобіганню корозії.

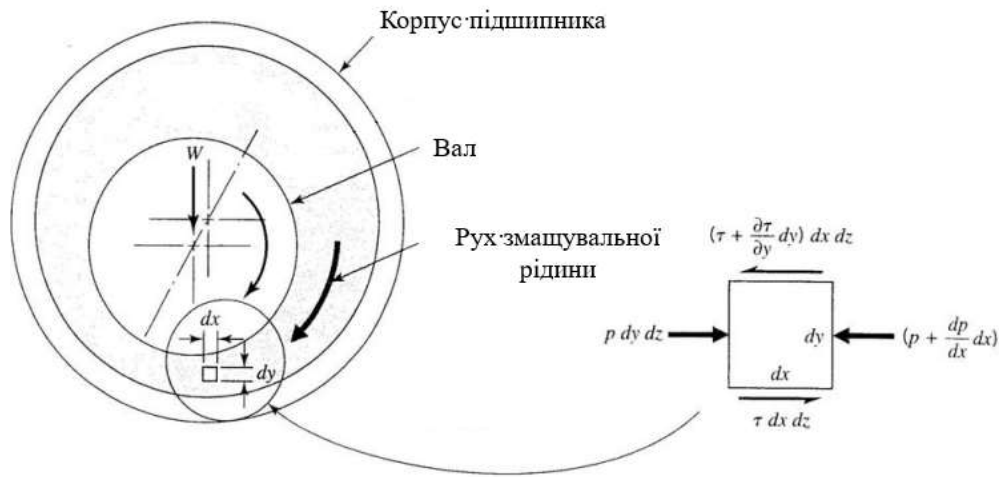


Рис. 1.6. Схема підшипника ковзання та напружено-деформований стан елементарної ділянки його поверхні під час експлуатації: x , y , z – тангенціальні, радіальні та осьові координати.

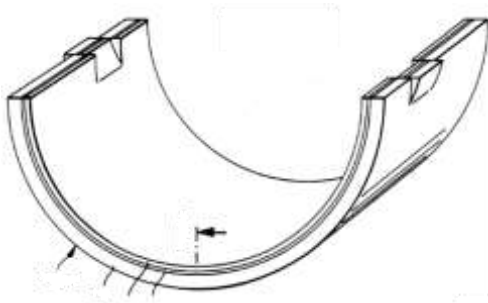
Рідинна плівка забезпечується за допомогою гідродинамічного нагнітання, спричиненого рухом ковзних поверхонь, та гідростатичного тиску, спричиненого масляним насосом, що подає тиск оливи безпосередньо у зону тертя. Іншими словами, мастило зменшує тертя між двома поверхнями, що рухаються відносно одна одної. Такий тип змащування зазвичай класифікують як граничне, змішане або гідродинамічне.

Інколи підвищення зносостійкості досягають шляхом використання змішаного мастила, у якому ковзні поверхні частково розділені, а частково контактують між собою. Щодо останнього режиму, тобто гідродинамічного змащування, ковзні поверхні зазвичай повністю розділені мастилом.

Гідродинамічне змащування, гідродинамічний тиск у мастилі утримує поверхні ковзання підшипника та вала відокремленими одна від одної. Гідродинамічний тиск зумовлений ковзним переміщенням площин. Відповідно, іншими словами, товщина плівки перевищує сумарну висоту шорсткості поверхонь. Коли підшипник ковзання працює в режимі гідродинамічного змащування, коефіцієнт тертя зазвичай нижчий, ніж за граничного змащування. Знос зазвичай не такий сильний у режимі гідродинамічного змащування, як у режимах граничного та змішаного змащування. Частково це

пов'язано з тим, що в режимі гідродинамічного змащування відбувається незначний або відсутній прямий контакт металу з металом.

Конструкції підшипників ковзання, рис. 1.7. є відносно недорогими порівняно з іншими підшипниками за аналогічного номінального навантаження. Підшипник ковзання є нескладним у виготовленні, легко монтується, має малу вагу та здатний «гасити» великі перехідні процеси, прискорення й навантаження. У конструкціях, таких як підшипники ковзання, деякі дослідники та розробники зосередилися на створенні більш гладких поверхонь ковзання в області, де відбувається механічний контакт.



а



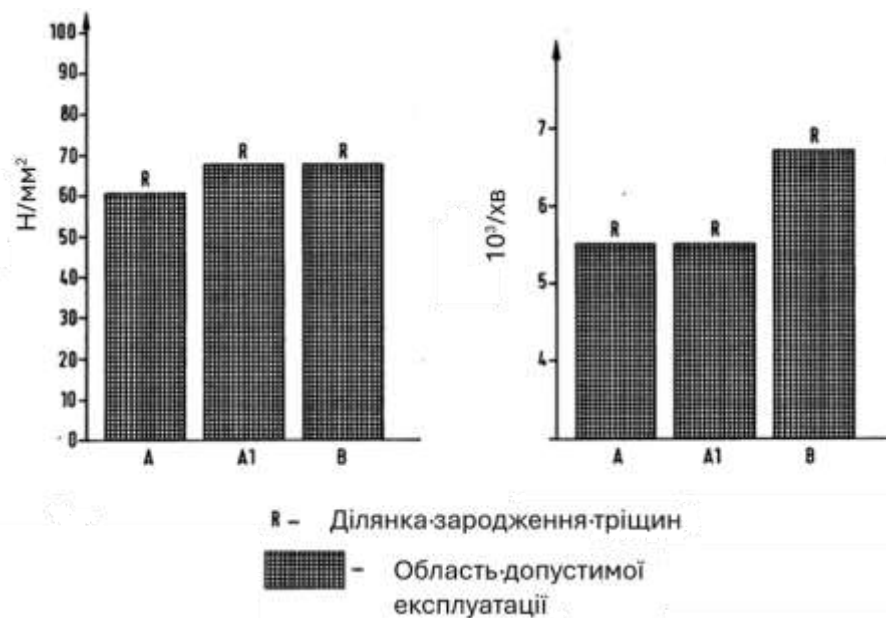
б

Рис. 1.7. Схема – а та фотозображення вкладиша (у даному випадку експлуатованого)

Більш гладкі поверхні плато мають кілька переваг для двигуна внутрішнього згоряння, таких як менший знос частинок під час синфазної роботи тощо. Навпаки, в інших запропонованих конструкціях на поверхнях ковзання конструкції підшипника ковзання передбачено текстуру

;

Глухий стукіт вкладишів. Його чути під час різкого натискання на педаль газу. На вкладишах різко зростає навантаження, і чути характерний глухий стукіт. У якому з циліндрів це відбувається також визначити неважко. Слід по чергово викручувати свічки і, якщо на черговій викрученій свічці стукіт зник, то в цьому циліндрі несправність.



а

б

Рис. 1.8. Порівняльний аналіз тисків що витримують шаруваті вкладиші, за даними патенту US4973523A (США):

A: сталь/AlNi2Mn1

A1: сталь/AlNi2Mn1 з додаванням Cu (0,5% за вагою)

B: сталь/Al/AlNi2Mn1Cu0.5 з додаванням Sn (10% за вагою).

На гістограмі, рис. 1.8 проведено порівняння впливу динамічного навантаження на композитні матеріали з покриттями з підшипникового матеріалу на основі алюмінію (час випробувань - 200 годин). Літера "R", що використовується на Рис. 1.8а та 1.8б, вказує на точки, в яких з'являються тріщини в алюмінієвому шарі, за умов, якщо значення динамічного навантаження (рис. 1.8а) або кількість обертів за хвилину (рис. 1.8б) перевищує максимальне значення. Нижче цього значення спостерігали штатну роботу вкладишів.

Динамічне навантаження визначали за кривими залишкового навантаження випробувань Андервуда за 150°C. Шаруваті матеріали, які порівнювали, було накладено на сталеву основу.

Композитний матеріал, що має сталеву основу та шар AlNi2Mn1 (схема A), витримує граничні напруження $\sigma_d = 60$ МПа. Якщо до алюмінієвого сплаву додано мідь, наприклад, 0,5% за вагою, він сягає значень від 60 до 70 МПа,

зазвичай приблизно 65 МПа (компонент Al). Як показано на гістограмі (схема В), алюмінієвий сплав AlNi2Mn1 з додаванням міді 0,5% а олова 10% за може мати приблизно таке ж динамічне навантаження, як і алюмінієвий сплав AlNi2Mn1 з додаванням Cu 0,5% за вагою.

Слід відзначити, що корисність інформації, наданої гістограмами, рис. 1.8, обмежена, оскільки вона характеризує лише один режим випробувань Андервуда, що відповідає умовам експлуатації вала, який обертається зі швидкістю близько 4000 обертів за хвилину. Як показано на гістограмі на рис. 1.8б, частота обертання або швидкість обертання вала, встановленого в підшипнику, досяжна за усталеної роботи, значною мірою залежить від складу алюмінієвого сплаву, що використовується як матеріал покриття підшипника.

Рис. 1.8б чітко показує перевагу досліджуваного компонента або сплаву В порівняно з компонентами або сплавами А та А1. Частота обертання понад 6500 обертів за хвилину може бути за умови усталеної роботи з наплавленням зі сплаву В. Крім того, сплав В має додаткові покращені властивості, до яких належать, зокрема: стійкість до заїдання, покращена стійкість до зносу, покращені властивості ковзання (зменшення тертя) та покращені властивості аварійного ходу, так що не потрібен шар для припрацювання.

1.3. Причини виникнення несправностей

Однак одним з недоліків підшипників ковзання є те, що така конструкція має більші втрати на тертя, зокрема, порівняно, наприклад, з підшипниками кочення. Одна з причин цього полягає в тому, що підшипник ковзання має значно більшу площу поверхні сполучення, тобто площу поверхні ковзання, порівняно з підшипником кочення. Крім того, швидкість ковзання підшипника зазвичай набагато вища порівняно з підшипником кочення. З цією метою велика площа контакту в поєднанні з високою швидкістю ковзання призводить до високих в'язких втрат на тертя для підшипників ковзання, тобто до високого зсуву плівки рідини.

Крім того, гідродинамічні підшипники ковзання є критично важливими компонентами передачі потужності, які несуть дедалі більші навантаження через зростання потужності транспортних засобів. Зношування вкладишів зумовлює те, що система мастила двигуна починає працювати менш ефективно. Це стає причиною несправності окремих частин силового агрегату та зниження його робочого ресурсу. Тому так важливо стежити за станом вкладишів і навіть за незначного зносу вживати заходів щодо їх усунення. Представляємо вашій увазі основні типи пошкоджень цих деталей та їхні характерні ознаки.

Провертання вкладишів колінвала. У певний момент посадкове місце не утримує деталі. Наприклад, через зростання зусиль тертя під час використання старого мастила, або його нестачу. Виникає аварійна ситуація – повертання вкладиша колінвала. При цьому він не просто повертається, а й злипається з шийкою колінчастого валу. Через це мотор може заглухнути й надалі не заводиться.

Попадання сторонніх частинок. Частинки бруду можуть потрапити у двигун під час його ремонту. Швидко поширюючись по ньому, сміття завдає великої шкоди ДВС і безпосередньо вкладишам. У результаті з'являються подряпини в усіх зонах тертя.



Рис. 1.8. Зношений вкладиш

Корозійне стирання. Іноді на звороті вкладишів виникає корозійне стирання. Воно може виникнути через те, що двигун часто працював на високих оборотах. Даній проблемі також сприяють встановлення деталей не того розміру, слабо затягнуті болти кріплення і наявність сторонніх тіл. Для контролю такого пошкодження відоме рішення, запропоноване у патенті

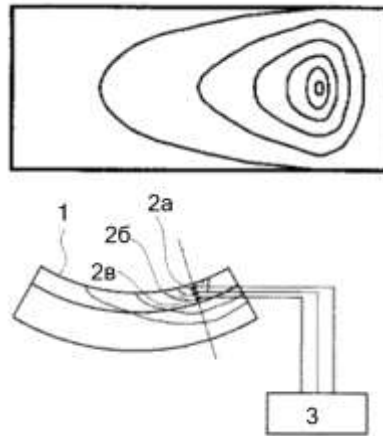


Рис. 1.9. Пристрій контролю підшипників ковзання, патент
JP2005133807A, Японія, 2003.

У новому пристрої контролю підшипник ковзання 1 виконано таким чином, що футеровка розміщена на внутрішній периферійній поверхні сталевій обоймі. Датчики температури 2а, 2б, 2в розташовані всередині обойми на різній глибині. У цьому пристрої контролю, дані вимірювання температури, зібрані датчиками температури, накопичуються на ПК та аналізуються для визначення градієнта температури, а температура масляної плівки визначається за вище згаданим градієнтом.

Інколи датчики температури 2а, 2б, 2в нормально до поверхні підшипника, і вони можуть послідовно зміщуватися один відносно одного в напрямку, ортогональному до напрямку обертання вала.

Втома металу. Через нерівномірне навантаження на вкладиші та проблеми у роботі двигуна виникає втома металу. Її можна визначити за частинками, що відшарувалися, на поверхні деталі (у центральній ділянці вкладиша).



Рис. 1.10. Зношений вкладиш із слідами втоми

Недостатнє змащування. Недостатня кількість мастила або його повна відсутність може призвести до того, що вкладиш почне активно стиратися або його робоча поверхня оплавиться.

Отже, збільшення витрати палива є наслідком зростання втрат на гідродинамічне тертя в різних складових двигуна. Крім того, гідродинамічне тертя робить значний внесок у загальне тертя. Однак, проектування компонентів двигуна з урахуванням механічного та гідродинамічного тертя є непростим завданням, оскільки ефект зменшення, наприклад, в'язкості оливи з метою зменшення середнього гідродинамічного тертя між двома компонентами може призвести до збільшення середнього механічного тертя між компонентами внаслідок чого виникає певна текстура пошкоджень. Текстуру цифрового зображення зазвичай вважають просторовий розподіл варіацій інтенсивності та/або тональних варіацій пікселів, що формують це зображення. У цьому описі текстура визначається за стохастичним підходом, рис. 1.11.

Цифрове зображення моделюють як статистичну реалізацію випадкового поля, використовуючи математичну модель розширення моделі випадкових броунівських полів («дробові броунівські поля»).

Таким чином, метод орієнтований на визначення глобальної сигнатури цифрового зображення шляхом комбінування множини коефіцієнтів Херста, оцінених локально в різних точках зображення.

Наприклад, спочатку визначають множину вікон аналізу на отриманому цифровому зображенні, а потім оцінюють показник Херста для кожного вікна аналізу, визначеного таким чином. H_i позначає показник Херста, оцінений для вікна, індексованого індексом i , де i - ненульове натуральне ціле число.

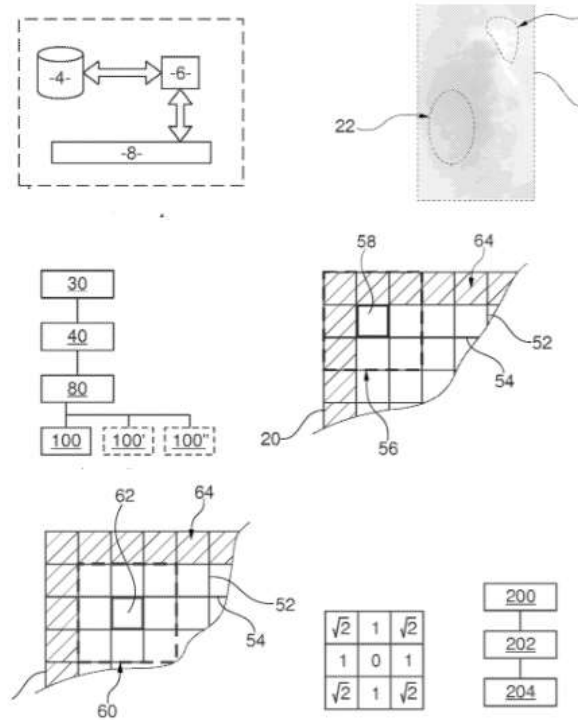


Рис. 1.11. Метод автоматичного аналізу текстури цифрового зображення,
EP3069321A1

Кожен індекс i однозначно ідентифікує вікно аналізу цифрового зображення. Показник Херста, наприклад, визначається, в контексті математичної моделі мультифрактального зображення "дробових броунівських полів", як критичний показник Гельдера броунівського поля. Таким чином, показник Херста є мірою «гладкості» зображення. Значення H_i тут є в інтервалі $[0;1]$. На практиці, значення H_i оцінюють за допомогою статистичних показників.

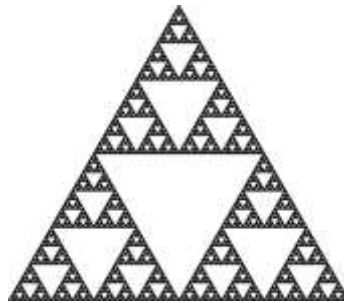
2. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗДІЛ

2.1. Фрактальність як міра впорядкованості систем

Фрактальна розмірність (англ. fractal dimension) — один із способів визначення розмірності множини в метричному просторі.

Фрактальна розмірність – коефіцієнт, що описує фрактальні структури або множини на основі кількісної оцінки їх складності, як коефіцієнт зміни в деталі зі зміною масштабу. Деякі типи фрактальної розмірності можна виміряти як теоретично, так і емпірично.

Трикутник Серпінського - це відомий геометричний фрактал, який вперше описав польський математик Вацлав Серпінський у 1915 році.



Розглянемо, як побудовано цей фрактал.

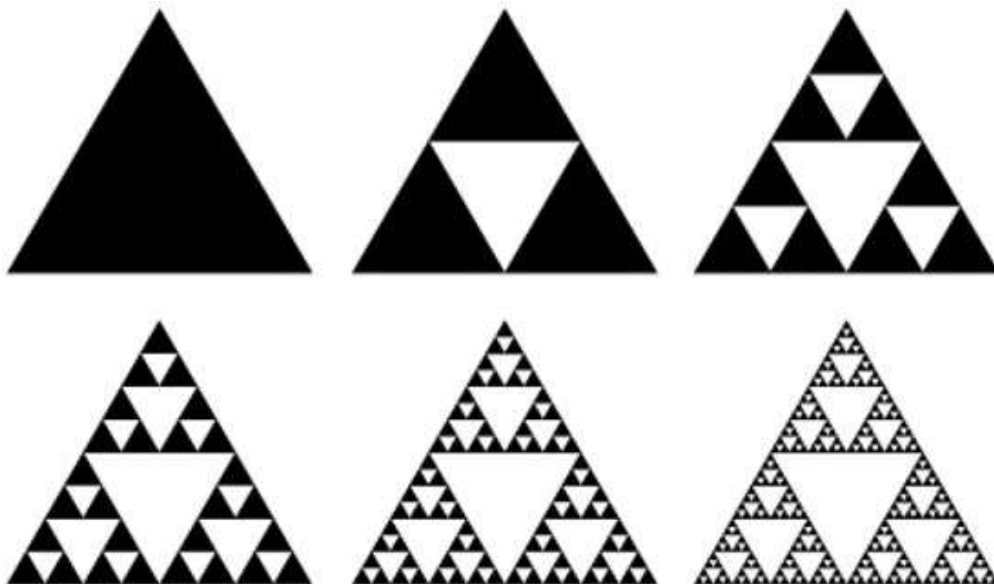


Рис. 2.1. Фізичні властивості трикутника Серпінського

Маючи рівносторонній трикутник, потім вирізаємо середній трикутник із загального трикутника, потім вирізаємо середини цих сформованих трикутників тощо.

Відомі також нестандартні способи побудови трикутника Серпінського. Нижче показано одержання трикутника Серпінського з квадрата, який багаторазово зменшено до $1/4$ від його початкової площі, як показано зверху. Виявляється, що можна використати будь-яку іншу фігуру подібним чином, щоб отримати трикутник Серпінського!



Рис. 2.2. Одержання трикутника Серпінського

Одержати трикутник можна і не з набору фігур, а з однієї безперервної лінії, багаторазово додаючи трапецієподібні дуги. Цей спосіб має назву «стріли Серпінського».

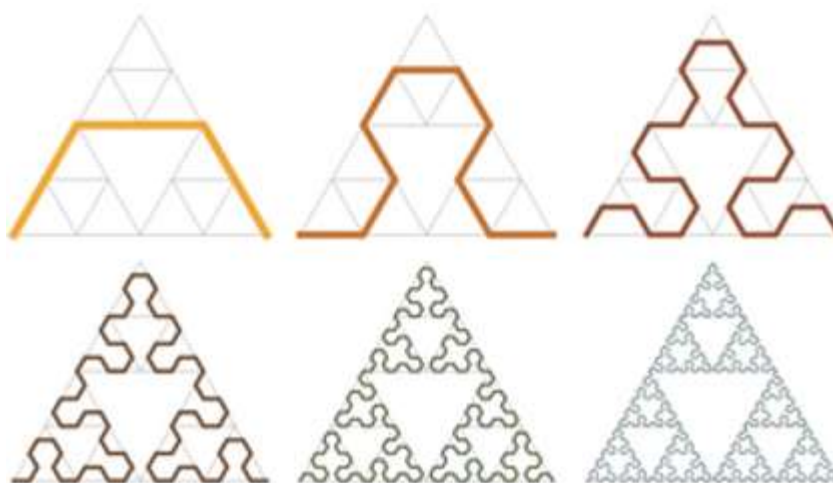


Рис. 2.2. Одержання трикутника Серпінського зі стріли Серпінського

Килим Серпінського/Губка Менгера

Кілим Серпінського - це плоский фрактал, вперше описаний Вацлавом Серпінським в 1916 році. Килим є одним із прикладів множини Кантора у двох вимірах (у більших вимірах — хмари Кантора).

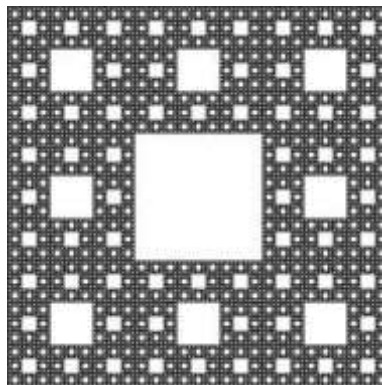


Рис. 2.3. Фізичні властивості килима Серпінського

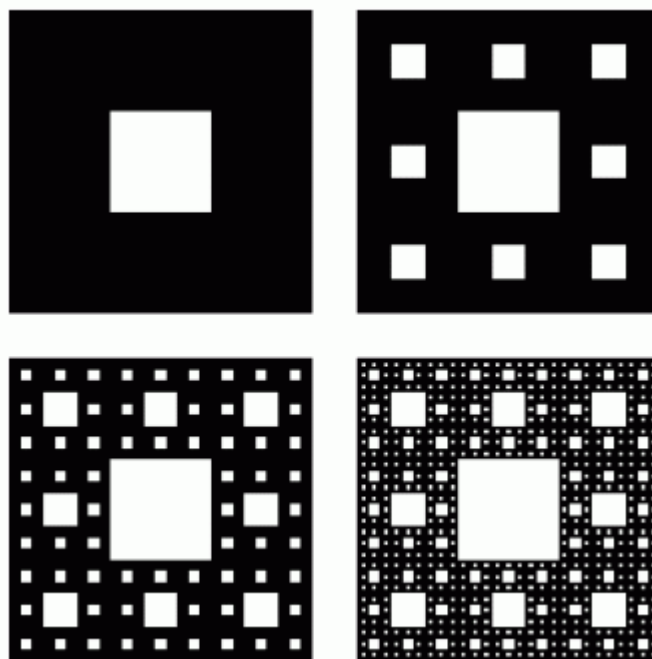


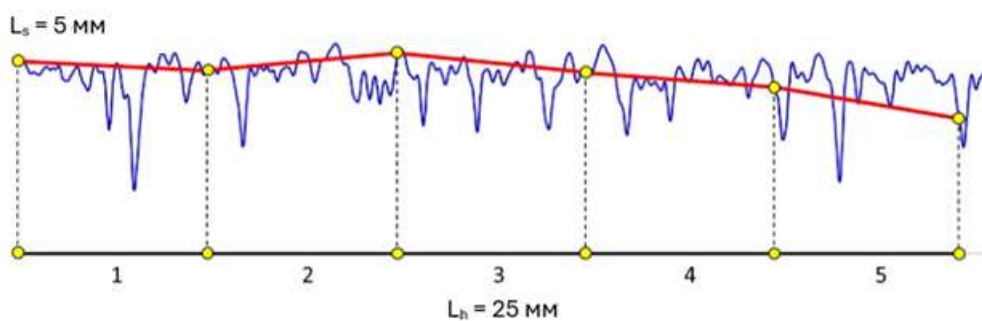
Рис. 2.4. Одержання килима Серпінського

Як і у випадку з трикутником, на кожному наступному кроці було вирізано середній квадрат з усіх квадратів, що залишилися. 3D-версія називається Губкою Менгера.

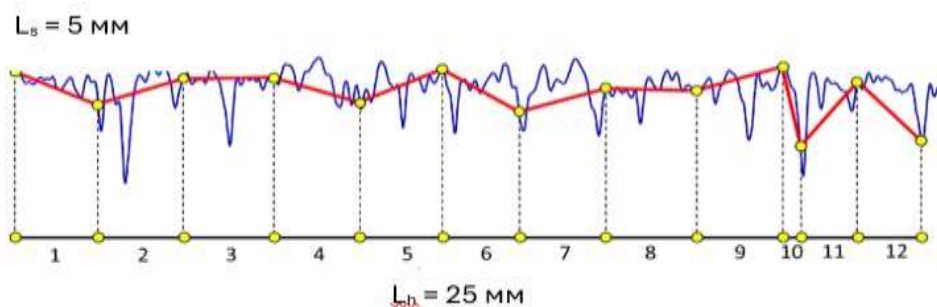
2.2. Методи онлайн-моніторингу

Відомо, що під час аналізу масштабу довжини відрізків лінії фіксованої довжини (опорний масштаб) можна застосовувати як лінійку, для вимірювання фактичної довжини профілю (або лінії поверхні). Сумарна довжина, поділена

на горизонтальну довжину, називається відносною довжиною. Це значення є в діапазоні від 1,0 до 2,0.



а



б

Рис. 2.5. Оцінювання фрактальної розмірності шорстких поверхонь (2D)

Вимірювання повторюють із різною довжиною відрізків, і будують графік: $\log_{10}$ (відносна довжина) як функція $\log_{10}$ (масштаб). Чим менша лінійка, тим більша відносна довжина, як показано на рис. 2.5.

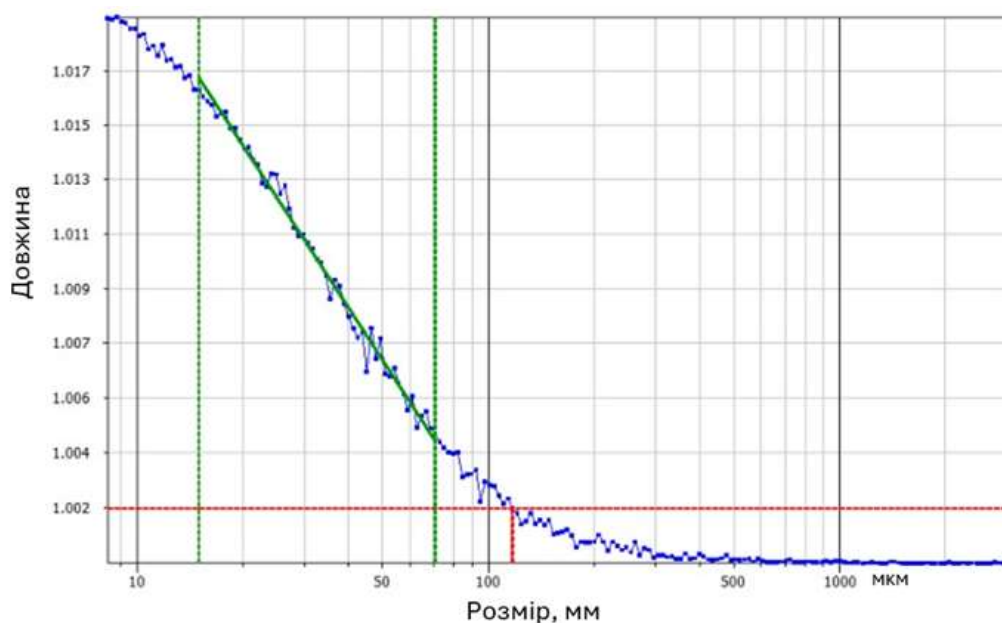


Рис. 2.6. Залежність між $\log_{10}$ (відносною довжиною) як функція $\log_{10}$ (масштаб) при вимірюванні фрактальної розмірності

Слід відзначити, що на цьому графіку великі масштаби розташовані праворуч (у напрямку розміру профілю), а малі - ліворуч (за розміром інтервалу). Це свідчить, що хвилястість (гладкі компоненти) розташована праворуч, а шорсткість — ліворуч. Встановлено поріг для знаходження перетину гладкості та шорсткості (SRC), який дає масштаб переходу між великими масштабами, де поверхня аналізується занадто далеко (її фрактальна розмірність близька до евклідової розмірності), та масштабами, де фрактальна розмірність дійсно описує поведінку поверхні. Центральна частина, між двома зеленими лініями, є майже лінійною, а її нахил використовують для обчислення фрактальної розмірності та інших параметрів.

Оскільки методи є відносно простими, виникає законне питання, чи можна аналізувати дані поверхні за допомогою того ж методу? Відповідь на це питання – так, оскільки відносну довжину можна обчислити на лініях або на стовпцях поверхні, а середнє значення відносної довжини використовується для побудови графіка.

Як варіант, можна використовувати метод масштабування площі, за якого трикутні плитки фіксованої площі використовуються для обчислення фактичної площі поверхні, а відносна площа отримується шляхом ділення на площу проекції. Отримується подібний графік, і можна обчислити ті самі параметри. У цьому випадку масштаб — це площа плитки, яка використовується як псевдолінійка.

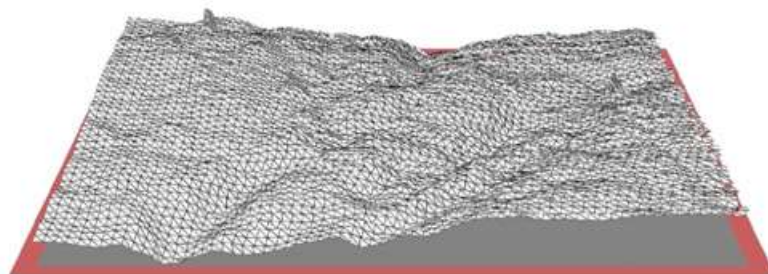


Рис. 2.7. 3D поверхня для вимірювання фрактальної розмірності

Додаткові параметри

Ці параметри використовують в різних галузях метрології та досліджень, таких як вивчення адгезійної міцності, аналіз руйнування, термічне напilenня, знос інструменту тощо. Усі вони розраховуються за графіком (масштабом довжини або масштабом площі).

Перетин гладкої та шорсткої поверхонь: масштаб розділення між гладкою та шорсткою областями. Цей параметр дуже корисний для застосувань, пов'язаних з тертям та контактом.

Максимальна відносна довжина/площа: значення в найменшому масштабі. На поверхні це значення збігається з параметром ISO Sdr.

Фрактальна розмірність (D_{ls}/D_{as}): розраховують на лінійній частині графіка за нахилом підібраного відрізка прямої.

Складність (L_{sfc}/A_{sfc}): характеризує, наскільки поверхня складніша за евклідову площину (або профіль евклідової лінії). Ця концепція дещо схожа на параметр ISO Sdq.

Шкала максимальної складності (ШМСК): масштаб, за якого поверхня демонструє найвищу складність. Цей параметр можна використовувати в кореляційних дослідженнях з функціональними атрибутами.

Коефіцієнт регресії R^2 : високе значення підтверджує точність оцінки складності.

Одна з переваг полягає в тому, що ці параметри обчислюються в межах діапазону масштабу, у якому функція є активною. Такий підхід з обмеженням масштабу є потужнішим, ніж обчислення параметра поля на поверхні зі стандартним фільтром.

Перелічені вище параметри описані в ISO 25178-2:2021, пункт 4.7, а також є частиною ASME B46.1:2002. <https://guide.digitalsurf.com/en/guide-fractal-analysis.html>

Фрактальність утворених і сформованих поверхонь

Відомо, що регулярно розташовані текстурні значно знижують коефіцієнт тертя за змішаного змащування. Для подальшого покращення характеристик тертя була висунута ідея фрактально текстурованих поверхонь, де зміна

нерегулярного розташування є більш вигідною для зменшення коефіцієнта тертя.

На рис. 2.8 , наведено схематичне зображення розташування круглих та прямокутних фрактальних поверхонь з дискретними ямками, для забезпечення мастильної ємкості поверхні. Круглі, так і прямокутні фрактали мають кращі властивість зниження коефіцієнта тертя, ніж текстури з регулярним розташуванням, причому прямокутники краще підходять для високих швидкостей одержання, а кола – для низьких.

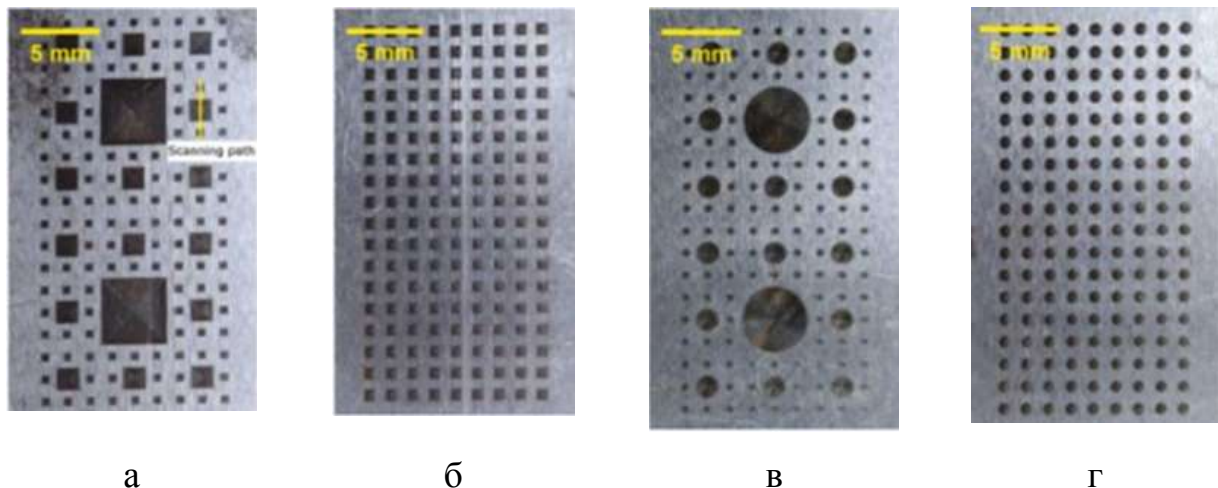


Рис. 2.8. Текстуровані поверхні з різними схемами розташування змащувальних ямок: а - схема фрактальної квадратної текстурованої поверхні; б - схема регулярно розподіленої квадратної текстурованої поверхні; в - схема фрактальної круглої текстурованої поверхні; в - схема регулярно розподіленої круглої текстурованої поверхні.

Технологія, запропонована винаходом CN106392774A (КНР), 2017 для вирішення проблем діагностування стану фрактальних поверхонь полягає в методі онлайн-моніторингу стану зносу на основі фрактальної теорії.

Відомий також метод оцінювання ефективності руйнування гірських порід на основі фрактальної розмірності зображення, див. патент CN119444832A (КНР). Його основною ідеєю є аналіз взаємозв'язок між фрактальною розмірністю зображення, питомою енергією та індексом шорсткості.

У цьому винаході встановлено кореляцію між фрактальною розмірністю D зображення гірського баласту, індексом шорсткості CI , а також питомою енергією SE на різних рівнях навколишніх порід. Виявляється, що: зі

збільшенням СІ фрактальна розмірність зображення D поступово зменшується, і ці дві величини знаходяться приблизно в логарифмічній залежності, а коефіцієнт кореляції становить близько 0,78; без урахування рівня навколишніх порід кореляція між фрактальною розмірністю D зображення гірських порід та SE не є очевидною, а загальний розподіл даних є відносно дискретним. За одного й того ж рівня навколишніх порід зі збільшенням фрактальної розмірності D зображення гірських порід SE поступово зростає, і ці дві величини перебувають у логарифмічній залежності. Раціональність оцінювання ефективності руйнування гірських порід за фрактальною розмірністю зображення можна визначити за ступенем лінійної кореляції. Винахід CN119444832A (КНР) можна використовувати для оцінювання ефективності руйнування гірських порід у будівельних проєктах, а потім — для коригування стратегії будівництва.



а

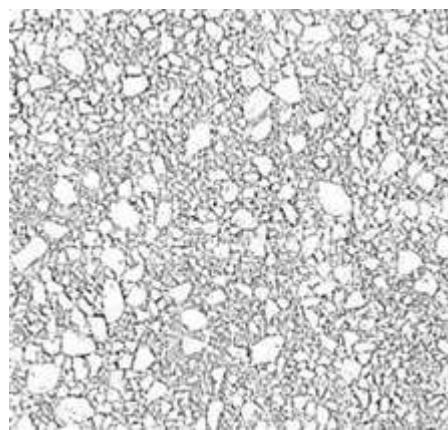
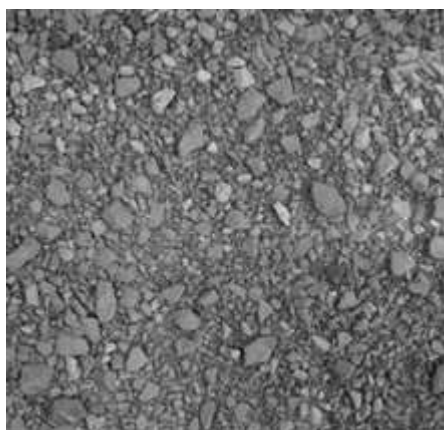


Рис. 2.9. Метод оцінювання ефективності руйнування гірських порід ТВМ на основі фрактальної розмірності зображення, CN119444832A (КНР): схема зйомки – а; фотозображення – б; розпізнані фрагменти – в.

Фрактальна теорія та метод на основі тестових даних для розрахунку втрат під час обкатки пари напрямних рейок

Запропоновано метод розрахунку величини зношування під час обкатки пар напрямних рейок на основі фрактальної теорії та даних випробувань, який містить такі кроки.

1. На основі функції Вейєрштрасса-Мандельброта вибирають модель контакту нерівностей контактної поверхні пари напрямних рейок, причому контакт між двома шорсткими поверхнями еквівалентний контакту між шорсткою поверхнею та іншою твердою поверхнею, та зробити такі припущення:

- шорстка поверхня є ізотропною та має фрактальні характеристики;
- під час аналізу процесу мікроконтакту не враховується зміцнення під дією деформації матеріалу, зміни глибини твердості та тертя між нерівностями; згідно з механічними даними, для розрахунку площі контакту нерівностей а використовується закон розподілу площ нерівностей на поверхні деталі;

2. Проводять випробування на зношення, вимірюють фрактальну розмірність D та характеристичний коефіцієнт масштабування G контактної поверхні досліджуваного зразка, обчислюють максимальну площу контакту нерівностей в поєднанні з контактним навантаженням F та визначають пружнопластичність нерівностей під час деформування;

3. Під час трибологічного процесу величину зношування на всій контактній поверхні оцінюють на кожному етапі пружно-пластичного деформування.

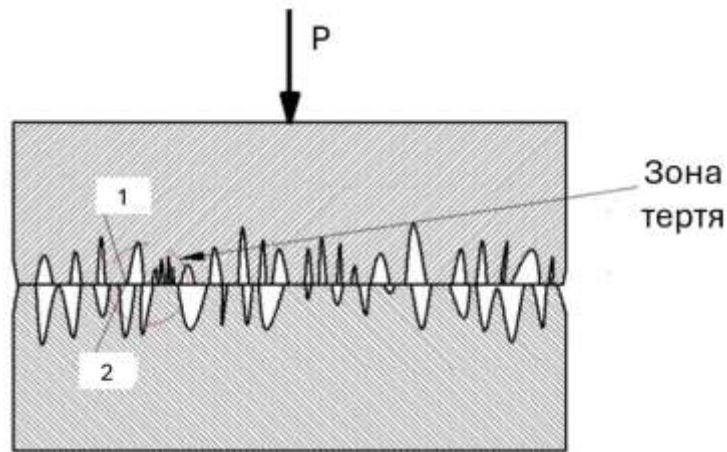


Рис. 2.9. Метод оцінювання зносостійкості за фрактальною теорією, CN120070937A

Пластична деформація - це постійна, незворотна зміна форми матеріалу під дією напруги . Вона аналізується за трьома різними ієрархічними шкалами: мікромасштаб (рівень атомів/кристалічної решітки), мезомасштаб (рівень зерен/субзерен) та макромасштаб (рівень об'ємної структури).

А. Мікромасштабний рівень

На мікрорівні деформація відбувається на атомному та кристалічному рівнях.

Механізми: Це зумовлено рухом і генерацією дислокацій (кристалічних дефектів), а також атомним ковзанням і двійниковим утворенням вздовж кристалографічних площин.

Вплив: Накопичуються незворотні локалізовані атомні зміщення, що зрештою дають достатньо енергії для запуску великомасштабного потоку матеріалу.

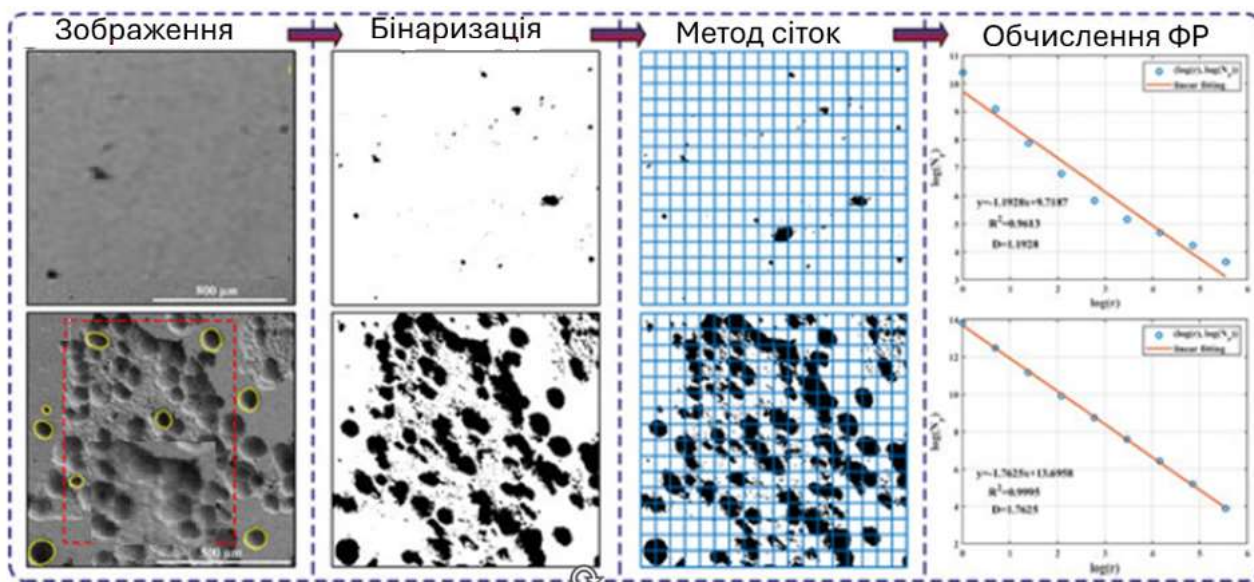


Рис. 2.10. Метод оцінювання зносостійкості за фрактальною теорією, програмна реалізація

Б. Мезомасштабний рівень

На мезомасштабі деформація масштабується до рівня окремих зерен, меж зерен та фазових меж.

Механізми: Деформація більше не є рівномірною. Зерна обертаються, змінюють орієнтацію та деформуються з різною швидкістю залежно від їхнього вирівнювання щодо прикладеного напруження.

Вплив: Ця шкала пояснює, чому виникають «ефекти розміру». При роботі з мікродеталлями або тонкими фольгами (де розмір компонента наближається до розміру зерен) традиційна механіка континууму порушується, оскільки локальні варіації зерен значною мірою домінують у поведінці.

В. Макрорівень

На макрорівні деформація описує загальну поведінку фізичного об'ємного матеріалу.

Механізми: Цей рівень об'єднує мільйони основних мікро- та мезопроцесів у усереднені, безперервні властивості матеріалу.

Вплив: Це шкала, яку інженери вимірюють під час стандартних випробувань на розтяг. Вона визначає об'ємні інженерні властивості, такі як межа текучості, межа міцності на розтяг і загальне видовження.

Типи поверхонь

Класифікація трибологічних поверхонь на гладкі та шорсткі є дуже складною, оскільки жодна з них не є молекулярно плоскою. Однак, виходячи з характеристик поверхонь та зносу на межі розділу між двома трибологічними взаємодіями, їх можна класифікувати на гладкі та шорсткі поверхні. На рис. 2.11 показано схематичні ілюстрації гладких і шорстких поверхонь.

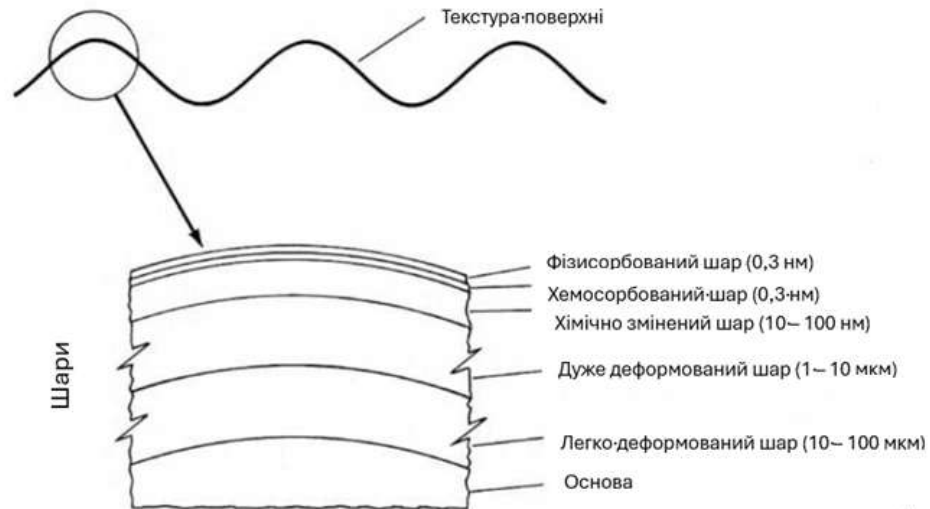


Рис. 2.11. Схематичне зображення гладких та шорстких поверхонь

Гладка поверхня: Трибологічну поверхню називають гладкою, коли нерівності поверхні дуже малі та існують на мікроскопічному рівні. Ця поверхня не викликає зносу на межі розділу під час ковзання, а тертя на межі розділу порівняно менше. Гладкі поверхні не мають значного впливу на енергоефективність механічних компонентів.

Шорстка поверхня: Трибологічну поверхню називають шорсткою, коли нерівності поверхні дуже великі, що призводить до зносу та високого тертя на межі розділу матеріалів під час ковзання. Шорсткі поверхні знижують ефективність будь-яких механічних компонентів, що призводить до втрати енергії.

Поверхневі шари твердого тіла

Окрім нерівностей на поверхні, трибологічні поверхні також мають зони, ці зони утворилися внаслідок різних процесів. На рис. 3 ми бачимо поверхневі шари на твердій поверхні, які є фізично сорбованими, хімічно сорбованими, хімічно реактивними, сильно деформованими, легко деформованими та шарами

основного матеріалу. На основному матеріалі утворення деформованого шару відбувається внаслідок процесу формування. Матеріали на поверхні можуть реагувати фізично або хімічно з навколишньою атмосферою, що призводить до утворення фізисорбованих та хемісорбованих шарів. Ці шари мають значний вплив на трибологічні властивості поверхонь.

Скануючий електронний мікроскоп (СЕМ): принципи та прикладизастосування

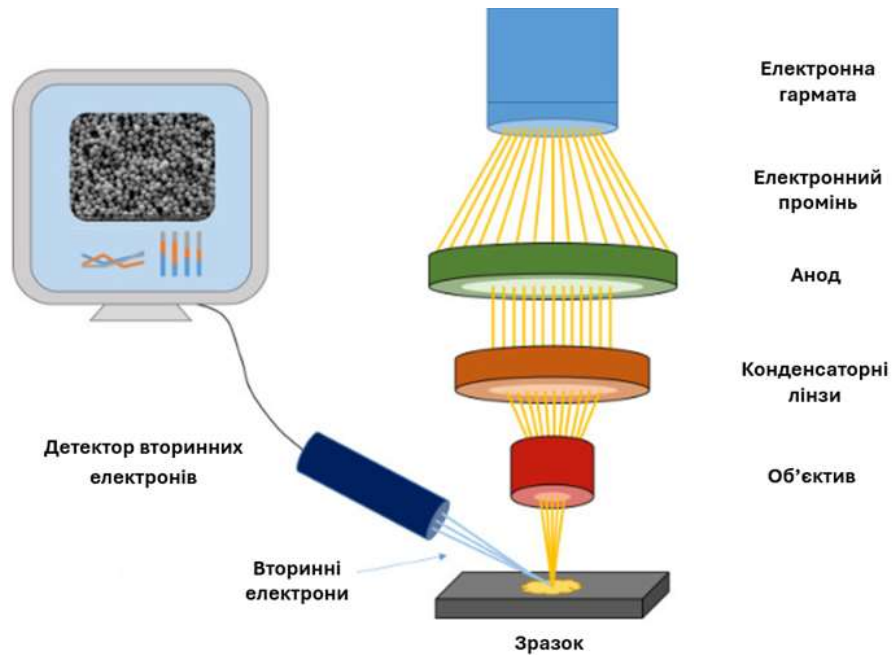


Рис. 2.11. Схематичне зображення скануючого електронного мікроскопа (СЕМ)

Скануючий електронний мікроскоп (СЕМ) - це вдосконалений інструмент мікроскопії, який долає обмеження роздільної здатності оптичних мікроскопів, використовуючи електрони замість світла. СЕМ комерціалізується вже близько 40 років; з того часу СЕМ розроблено для різних застосувань. СЕМ використовується в галузях, що стосуються спостереження за властивостями зразків у мікро- та нанорозмірних частинках. На рис. 1 показано прилад СЕМ та приклади одержаних зображень зношених вкладишів.

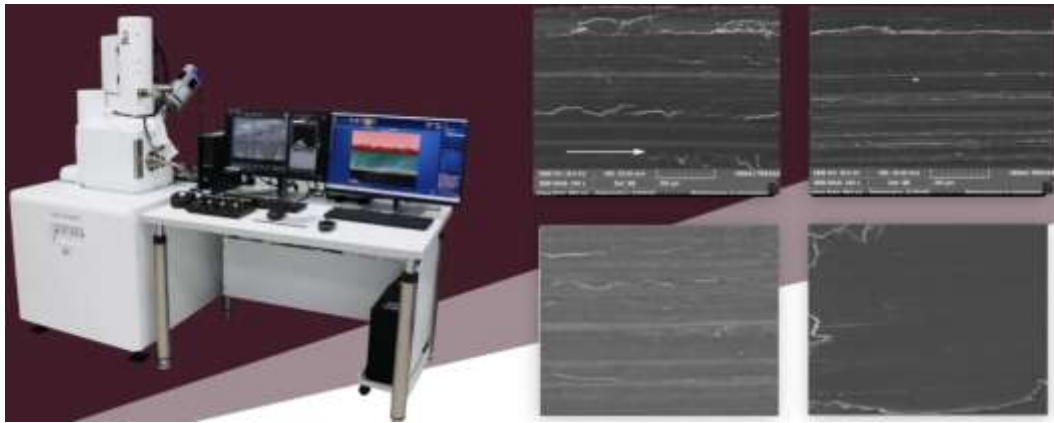


Рис. 2.12. Скануючий електронний мікроскоп (СЕМ): тріщини та зношування аналізованої поверхні

СЕМ – це електронний мікроскоп, який використовується для спостереження зразків шляхом їх опромінення тонким пучком електронів високої енергії. Різноманітність сигналів, що випромінюються з поверхні зразка, розкриває інформацію про нього. За допомогою цієї технології можна отримати таку інформацію, як-от зовнішню морфологію, хімічний склад і кристалічну структуру зразків. Дані, зібрані з поверхні зразка, генеруються у вигляді двовимірного зображення, яке описує просторові зміни властивостей поверхні зразка. Схематичне зображення СЕМ показано на рис. 2.13.



Рис. 2.13. Схема скануючого електронного мікроскопа (СЕМ)

СЕМ працює, спрямовуючи тонкий пучок високоенергетичних електронів

на поверхню зразка, і генерує різні сигнали, що дають змогу розкрити його властивості. Взаємодія електрона зі зразком утворює вторинні електрони, зворотно розсіяні електрони, дифракційні електрони, фотони, світло та тепло. Серед них вторинні та зворотно розсіяні електрони в основному використовуються для формування зображень — перші показують морфологію та топографію поверхні, а другі підкреслюють композиційний контраст у багатофазних зразках. Схема цього процесу показана на рис. 2.13.

СЕМ – це дуже складна структура з різноманітними компонентами, що працюють у ній для аналізу поверхні зразка. Основні компоненти СЕМ включають електронну гармату, конденсор, об'єktiv, предметний столик, детектор вторинних електронів, дисплей зображення, записувальну систему та вакуумну систему.

Електронна гармата: електронна гармата використовується для створення електронного променя, який здебільшого створюється термоелектронною емісією з катодного джерела (вольфрамова розжарена нитка). Нитка розжарення нагрівається до дуже високої температури (2800 K), а випромінюваний термоелектрик фокусується через металеву пластину, яка діє як анод. Це робиться для того, щоб сфокусувати електронний промінь у потрібній точці.

Конденсор і об'єktiv: ці лінзи використовуються для регулювання діаметра електронного променя. Конденсор допомагає підсилити електронний промінь і регулювати його діаметр, коли він проходить через цю лінзу. Об'єktiv використовується для фокусування електронного променя на поверхні зразка, і він визначає його кінцевий діаметр.

Столик для зразка: він діє як опорна основа, яка стабільно підтримує його, плавно рухаючись у вертикальній, горизонтальній та обертальній площинах.

Детектор вторинних електронів: Він використовується для виявлення вторинних електронів, що випромінюються зразками, і розміщується над об'єktivом. Для виявлення вторинних електронів використовують магнітні поля.

Відображення та запис зображення: Вихідні сигнали, отримані від детектора вторинних електронів, посилюються та надсилаються до блоку відображення. Спочатку для блоків відображення використовувалися електронно-променеві трубки, проте зараз застосовують рідкокристалічні дисплеї. Запис цих зображень здійснюється в цифровому форматі.

Вакуумна система: електронно-оптична система та камера для зразка повинні перебувати у вакуумі, тому компоненти відкачуються за допомогою дифузійних насосів. У випадку середовища без олії використовуються турбомолекулярні насоси.

Переваги та недоліки скануючого електронного мікроскопа (SEM)

Обробка зображень та аналіз топографічних характеристик будь-якого зразка матеріалу є дуже простими у випадку SEM. Використовуючи різні методи, такі як метод зворотно розсіяного електронного пучка та метод дифракції зворотно розсіяних електронів, можна отримати різноманітну інформацію, зокрема про орієнтацію кристалічної структури та хімічний склад зразків. SEM є одним з найбільш використовуваних методів аналізу поверхні матеріалів.

До недоліків SEM належить вибір розміру зразка, який має бути розміщений у камері для зразка. Склад зразків також відіграє важливу роль, оскільки зразки, що окислюються за низького тиску, або вологі зразки, такі як органічні матеріали, неможливо визначити за допомогою цієї методики. Крім того, матеріали повинні бути електропровідними або мати провідні покриття для аналізу даних.

SEM використовують для отримання зображень високої роздільної здатності форм матеріалів і визначення хімічного складу шляхом отримання елементних карт. SEM використовується для ідентифікації фаз на основі якісного хімічного аналізу або кристалічної структури. Зображення зворотно розсіяних електронів можуть бути використані для визначення фазового розрізнення у багатофазних зразках. Тоді як дифракційні детектори зворотно розсіяних електронів використовуються для визначення мікроструктури та кристалографічної орієнтації у зразках.

Оптико-цифрова профілометрія

Профілометрія – це метод, який використовують для отримання топографічних даних з поверхонь. Отримані дані можуть бути як точковими, так і лінійними або тривимірними. Топографічні характеристики поверхні, такі як морфологія поверхні, висота сходинок та шорсткість поверхні, можна отримати за допомогою профілометричного дослідження. Це можна виконати за допомогою фізичного зонда або джерела світла. Зображення оптичного профілометра, отримане за допомогою приладів Zygo, показано на рис. 2.14.

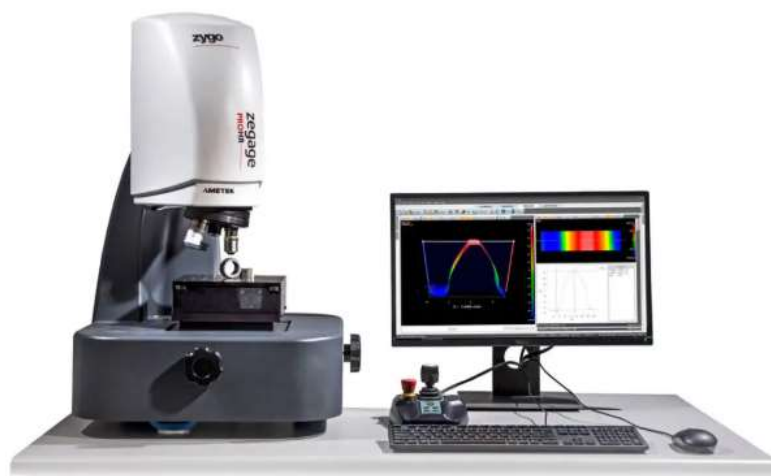


Рис. 2.14. Оптичний профілометр із системою керування Zygo

Оптична профілометрія – це метод, що використовується для топографічного вивчення поверхні матеріалів і працює за принципом світлового зондування замість фізичного зонда для отримання даних. Головною особливістю цього методу є спрямування джерела світла для виявлення тривимірних даних поверхні. Існують різні способи використання оптичних методів, такі як оптична інтерференція, фокусування та фазове виявлення, конфокальна апертурна детекція, проекція візерунка та оптична візуалізація.

Принцип роботи оптичної профілометрії полягає в неруйнівному, безконтактному методі аналізу поверхні. Оптичний профілометр – це тип мікроскопа, в якому джерело світла використовується для аналізу топографії поверхні.

Світло від лампи профілометра розділяється на два шляхи за допомогою

розщеплювача променя: один шлях спрямований на поверхню, а інший — на опорне дзеркало. Відбиття від цих двох шляхів рекомбінуються та проєктуються на матричний детектор. різниця в шляху рекомбінованих променів становить порядку кількох довжин хвиль, що призводить до меншої інтерференції. Вертикальна роздільна здатність може бути отримана порядку кількох ангстрем, а поперечна роздільна здатність залежить від об'єктива та коливається від 0,3 до 8 мікрон [2]. Принцип роботи оптичного профілометра показано на рис. 2.15.

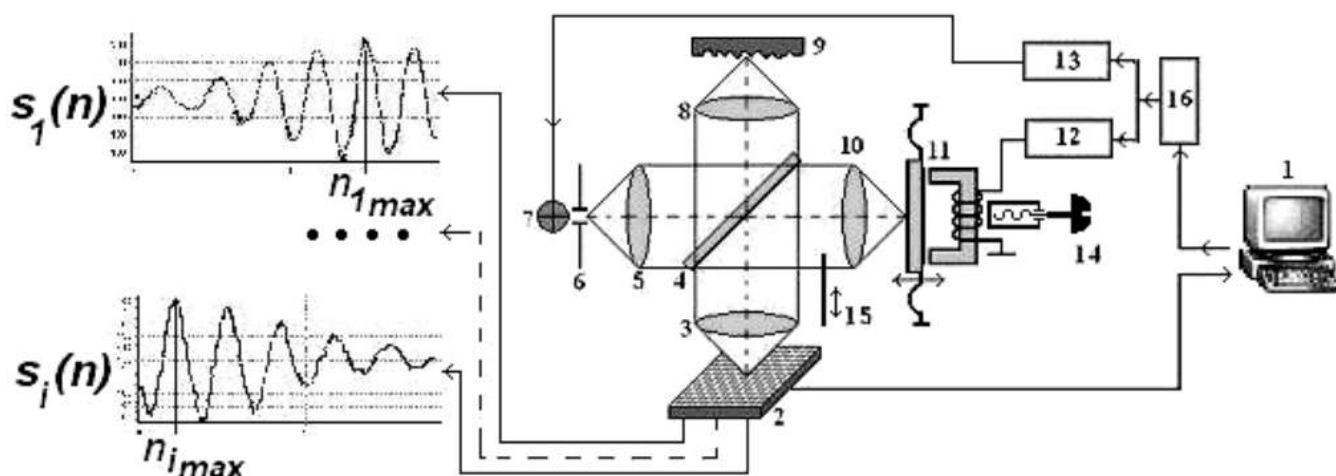


Рис. 2.15. Принципова схема оптичного профілометра на базі мікроінтерферометра, Закієв В.І., 2019

Характеристики профілометра дуже важливі для правильного аналізу топографії поверхні, тому слід враховувати такі важливі фактори:

Просторова роздільна здатність: вона різна для різних профілометрів; вона здебільшого змінюється в поздовжньому та поперечному напрямках. Діапазон цієї просторової роздільної здатності залежить від цілей користувачів, які, у свою чергу, визначаються різними рівнями точності.

Поле зору: Поле зору – це загальна площа поверхні матеріалу, яку можна виміряти за допомогою профілометра. Це важливо для розуміння властивостей більшої площі, і залежить від типу профілометра та його розміру.

Час отримання зображення: це ще один важливий фактор профілометра, який залежить від методу вимірювання, необхідного типу зображення, частоти кадрів і точності.

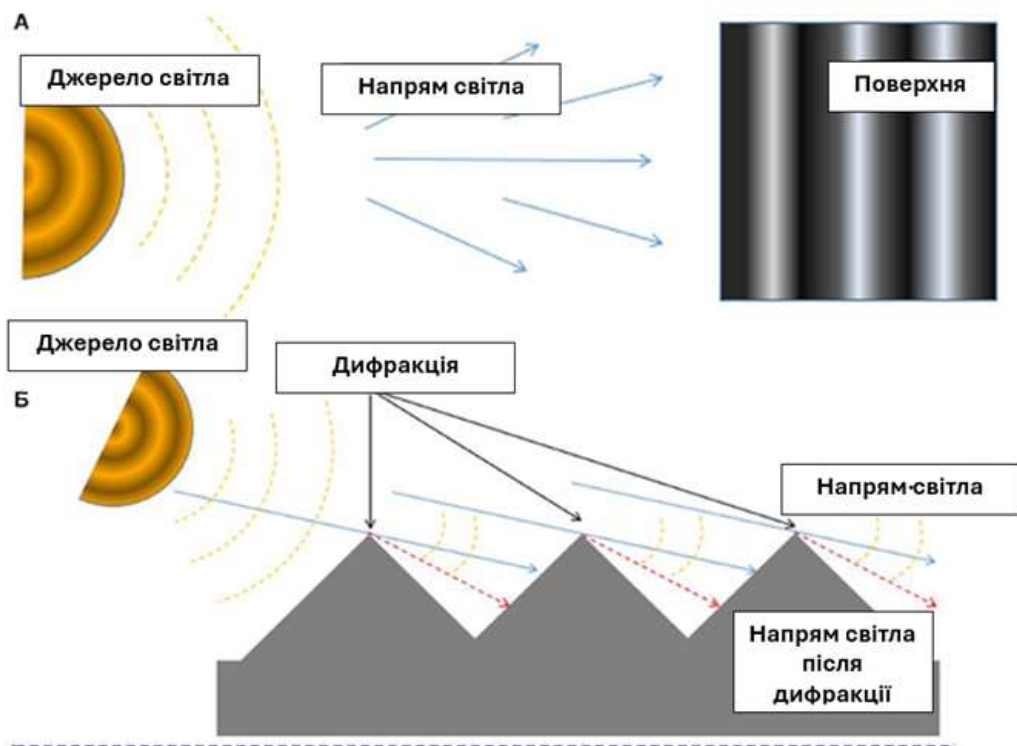


Рис. 2.16. Діаграма розсіяного світла, що падає на досліджувану поверхню: (А) напрямок світла, що падає на поверхню, та (В) дифракція світла на вершинах зразка.

Оптичний профілометр працює за принципом безконтактного режиму, де джерело світла використовується для аналізу поверхні матеріалів, отже, можливе отримання справжнього зображення там, де можна отримати вимірювання площі. Збір даних за допомогою цієї методики є високошвидкісним порівняно з контактним режимом, а також його можна отримати для більших площ. Цей метод є неруйнівним, який не пошкоджує зразок, тому його можна використовувати для подальшого аналізу. За допомогою цієї методики можна отримати критичні розмірні вимірювання, вимірявши координати x , y та z , що допомагає отримати тривимірні дані про поверхню.

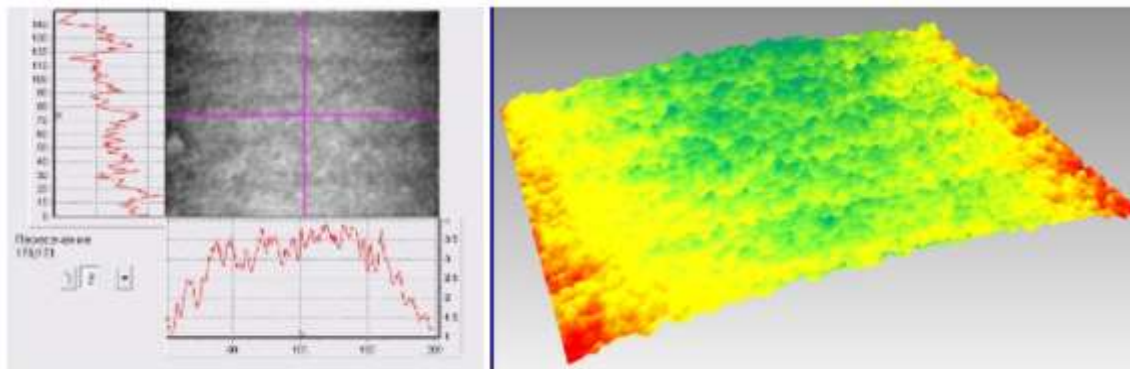


Рис. 2.17. Двовимірна (а) та тривимірна (б) топографія поверхні ДІ після фрезерування, Закієв В.І., 2019

2.3. Технологічні аспекти аналізу зображень зношеної поверхні

Процес зношування вкладишів є складним і нелінійним, а фрактальна теорія - дуже активною галуззю нелінійних наукових досліджень. Вона забезпечує ефективний метод розв'язання складних нелінійних задач і сприяє подальшому розвитку механічної науки та технологій у низці аспектів. Різні фактори зношування мають прямий або опосередкований вплив на стан поверхні тертя, що призводить до невизначеності та ускладнює отримання експериментальних даних і результатів різання з високою стабільністю. Фрактальні методи можуть характеризувати знос поверхні з нелінійністю та випадковістю. Для вирішення вищезазначених технічних проблем у винаході пропонується метод онлайн-моніторингу стану зносу вкладишів у поєднанні з теорією фракталів.

Програмний комплекс Fractalyse може аналізувати як дані оптичної мікроскопії, так і скануючої мікроскопії та інші види зображень. Програма підтримує три типи геометричних фігур: точки, прямі та багатокутники. Коли аналізований файл завантажують через меню Load vector data, програма автоматично створює новий шар, який відображається в графічному інтерфейсі користувача.

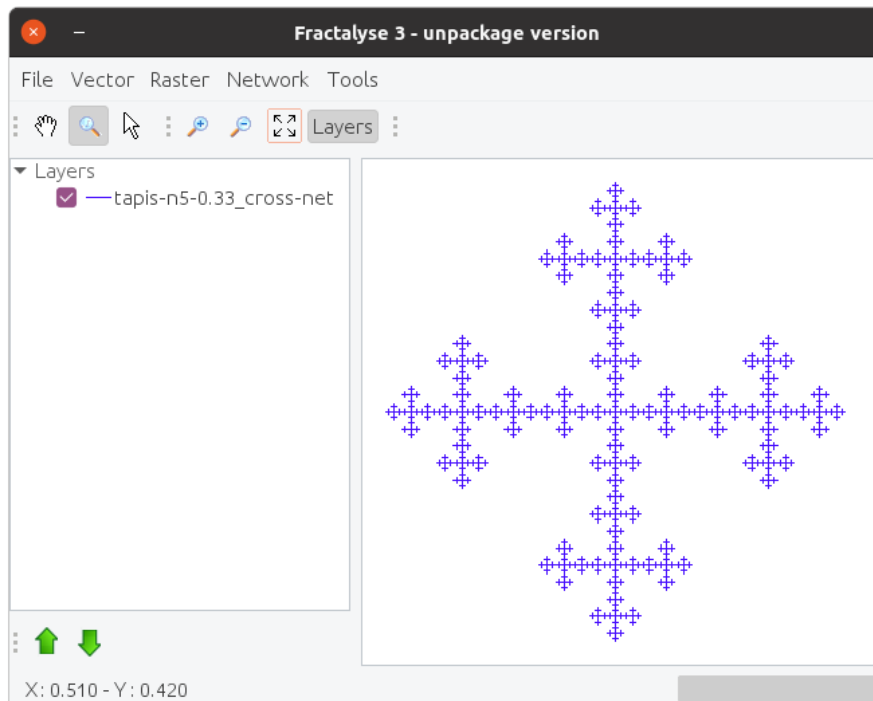


Рис. 2.18. Векторні дані, завантажені у Fractalyse

У разі, якщо векторний шар містить лише прості лінійні геометричні об'єкти, автоматично створюється графове представлення мережі. Це дозволяє користувачу виконувати мережевий аналіз поряд із векторним.

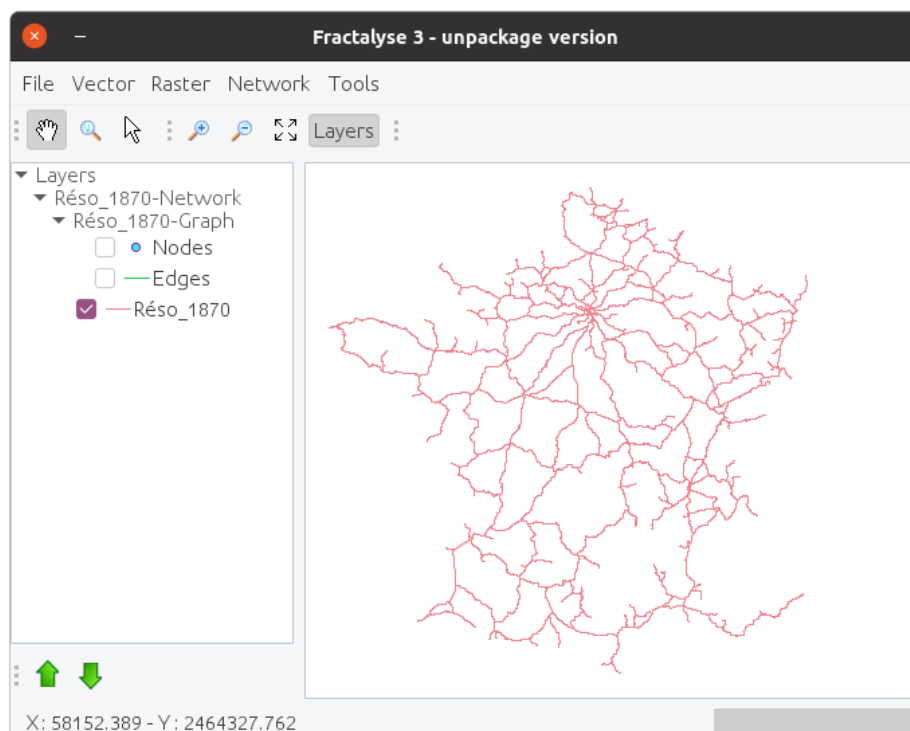


Рис. 2.19. Дані векторної мережі, завантажені у Fractalyse

Завантаження растрових даних

Fractalyse може завантажувати два типи растрових даних: TIFF та Ascii Grid. Коли вхідний файл даних завантажується з меню «Завантаження растрових даних», створюється новий шар і відображається зображення. Якщо зображення містить лише значення 0 і 1, Fractalyse класифікує шар як бінарний і встановлює білий колір для 0, а чорний - для 1. В іншому випадку він встановлює кольоровий діапазон у відтінках сірого для зображення. Кольорові зображення (RGB) не підтримуються.

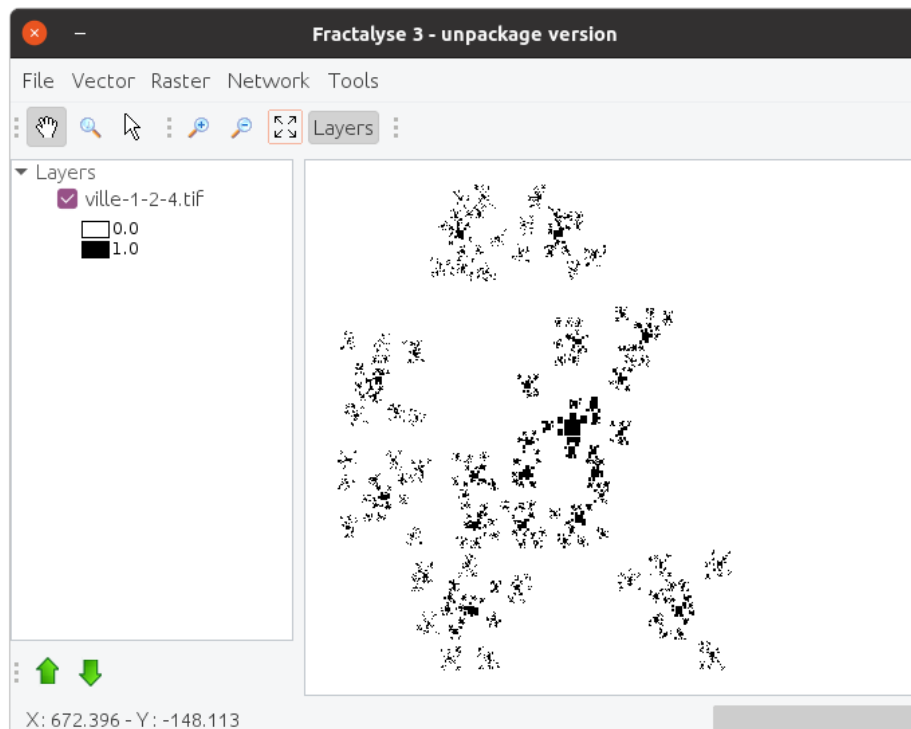


Рис. 2.20. Растрові бінарні дані, завантажені у Fractalyse

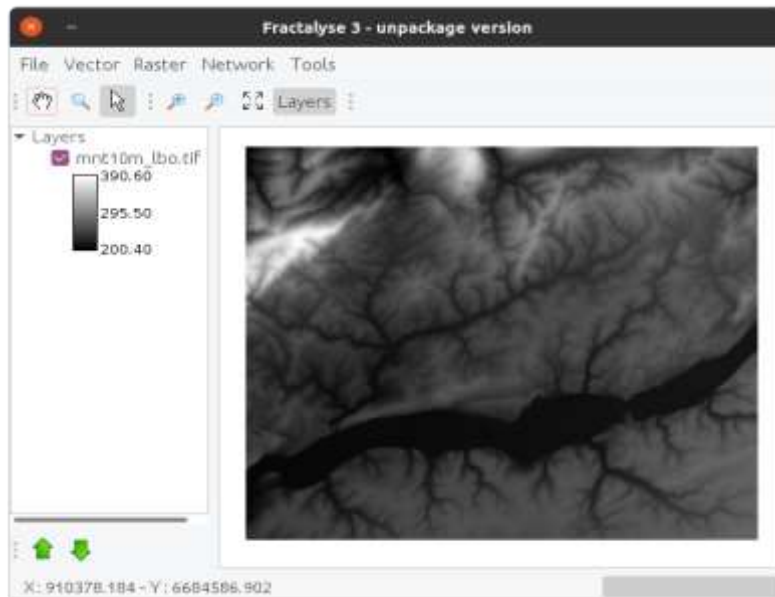


Рис. 2.21. Шар даних у растрових відтинках сірого, завантажений у Fractalyse

Завантаження меню мережевого графіків

Якщо ваші мережеві дані визначені як точковий шар і таблиця зв'язків, ви можете завантажити мережу з меню «Завантажити мережевий графік».

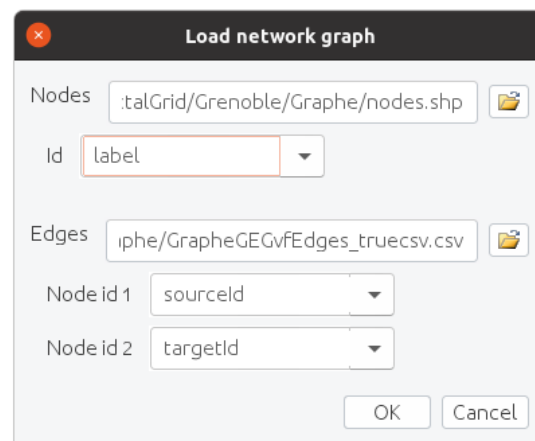


Рис. 2.22. Діалогове вікно, яке відкривається меню «Завантажити мережевий графік»

Меню інструментів

У випадку векторного аналізу деякі типи даних можуть не підтримуватися (наприклад, лінії або полігони не можуть використовуватися для аналізу кореляцій). Коли використовуються растрові дані, більшість видів аналізу потребує двобінних вхідних

даних. Fractalyse інтегрує функції в меню Інструменти, які дозволяють конвертувати векторні дані в растрові дані (меню Rasterization) та конвертувати сірі растрові дані в двійкові дані (меню Binarize).

Меню Rasterize перетворює векторні дані на растрові. Будь-який векторний шар можна растризувати. Якщо Field не заповнено, результатом є бінарний растровий шар, а в іншому — сірий растр. Якщо векторний шар містить полігони, режим растеризації можна задати за допомогою опції Poly.

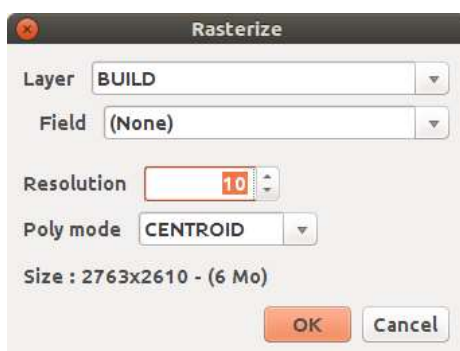


Рис. 2.23. Растеризація векторного шару

Меню Binarize перетворює сірий растр у чорно-білий растр.

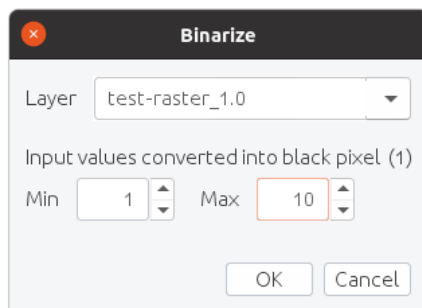


Рис. 2.24. Бінаризація шару сірих відтінків

Негативне меню повертає бінарні растрові дані (тобто чорно-білі зображення). Користувач має клацнути правою кнопкою миші на шарі та вибрати меню «Негатив». Чорні пікселі стають білими, а білі - чорними.

Меню вибору дозволяє вибрати частину зображення для окремого аналізу. Після вибору регіону, який слід проаналізувати, його виділяти прямокутником.

І натискали кнопку «Створити», щоб створити новий шар, що містив лише вибраний регіон.

Клацнувши правою кнопкою миші на шарі, користувач може отримати доступ до контекстного меню, що дозволяє:

Видаліть: видалити поточний шар із Fractalyse

Стиль: змініть стиль малювання шару

Експорт: зберегти поточний шар у новий файл

3. СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

Відомий підхід опису зображень поверхонь зносу за допомогою тексту або ключових слів і перевірки каталогу, отриманого в результаті цього опису. Недоліком цього дуже простого методу є те, що він вимагає часу для створення каталогу, і неможливо описати зображення з достатньою точністю чи об'єктивністю, особливо тому, що об'єкт пошуку не завжди відомий на даний момент, і важливі елементи зображень будуть знехтовані. Крім того, складні елементи поверхні описуються категорією, частиною якої вони є, і, отже, будуть ідентифіковані лише після візуального огляду зображення, щоб встановити, чи відповідають вони вибірці. Таким чином, цей метод не дуже практичний для великих обсягів даних.

Інше рішення полягає в пошуку об'єкта (у даному випадку пошкоджень поверхні, зумовлених тертям) шляхом опису його контуру або текстури та дослідження його в банку даних зображень. Для цього слід провести цифровий аналіз зображень, щоб отримати з них необхідну інформацію. На жаль, не існує методу вилучення контуру або текстури об'єктів, який би був ефективним у всіх випадках. Такі методи не працюють, коли об'єкти частково замасковані або знаходяться в тіні, або коли вони по-різному освітлені на зразку та на одному із зображень.

Інший можливий метод полягає у порівнянні зразка з різними частинами зображень. Порівняння є позитивним, коли точки фрагмента зображення мають той самий відтінок, що й точки зразка. Однак час обчислення дуже довгий через кількість порівнянь, які необхідно виконати, і метод також стає непрацюючим, якщо зразок присутній на зображеннях з іншими розмірами або орієнтацією.

Фрактальний об'єкт має властивість бути ідентичним у своїх частинах. Виділивши з нього фрагмент, як пропонується у патенті US6229931B1 (США), одержуємо фрагмент, ідентичний початковому об'єкту. Зображення фрактального об'єкта можна отримати за допомогою певних геометричних перетворень, що застосовуються багаторазово до

початкового зображення, яке деформується та сходиться до фрактального об'єкта, що називається атрактором геометричних перетворень. Хоча звичайні зображення насправді не є фрактальними об'єктами, можна визначити геометричні перетворення, атракторами яких є ці зображення. Потім зображення можна відновити, застосовуючи ці перетворення кілька разів до випадкового початкового зображення. Тоді потрібно лише записати геометричні характеристики перетворення. Таким чином, ці перетворення визначаються шляхом поділу зображення на діапазони та встановлення відповідності домену або області того ж зображення, тобто іншої частини зображення, що має таку ж форму, але більшу поверхню, кожному з діапазонів. Таким чином, геометричні перетворення, здатні створити атрактор, стискаються, тобто деталі, на які вони діють, зменшуються. Відповідності, за допомогою яких пов'язані діапазони та домени, вибрані таким чином, щоб домени були схожі на сектори, з якими вони пов'язані, тобто вони мали подібний вигляд після можливого накладення на них певних модифікацій яскравості, контрасту, обертання або симетрії.

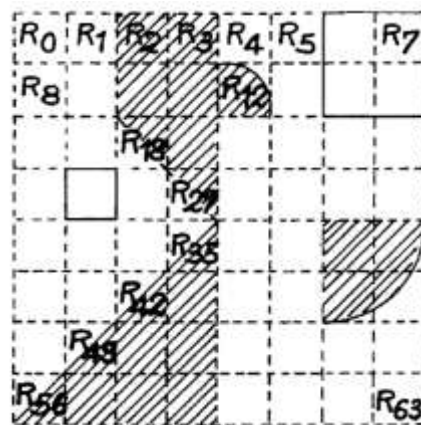


Рис. 3.1. Спосіб стиснення зображення за допомогою його фрактальних властивостей, патент US6229931B1 (США)

Монофрактальний аналіз

Fractalyse містить чотири методи оцінки (моно-) фрактальної розмірності 2D-об'єкта:

- аналіз підрахунку клітин;

- аналіз дилатації;
- кореляційний аналіз;
- радіальний аналіз.

У будь-якому випадку, оцінка фрактальної вимірності передбачає:

- процес підрахунку,
- процес оцінювання.

Процес підрахунку здійснюється покроково, відповідно до ітеративної логіки. На кожному етапі ітерації враховують кількість елементів (полігонів, пікселів тощо), що містяться у вікні підрахунку. Від одного кроку до іншого розмір вікна підрахунку збільшується. Отже, два елементи змінюються залежно від етапу підрахунку (ітераційного кроку) (i):

- кількість підрахованих елементів (N_i),
- розмір вікна підрахунку (R_i).

Послідовність точок (r_i, N_i) відображена на двовимірній графі. Вісь Y відповідає кількості підрахованих елементів (N_i), а вісь X — розміру вікна підрахунку (r_i), який зростає від кроку до кроку.

Процес оцінювання полягає у аналізі ряду точок (r_i, N_i) утворює криву (яку називають емпіричною кривою). Ця емпірична крива має іншу - оцінену криву. Якщо емпірична крива підпорядковується (моно-) фрактальному закону, оцінена крива має форму степеневого закону (параболічного або гіперболічного):

$$N = r^D$$

або

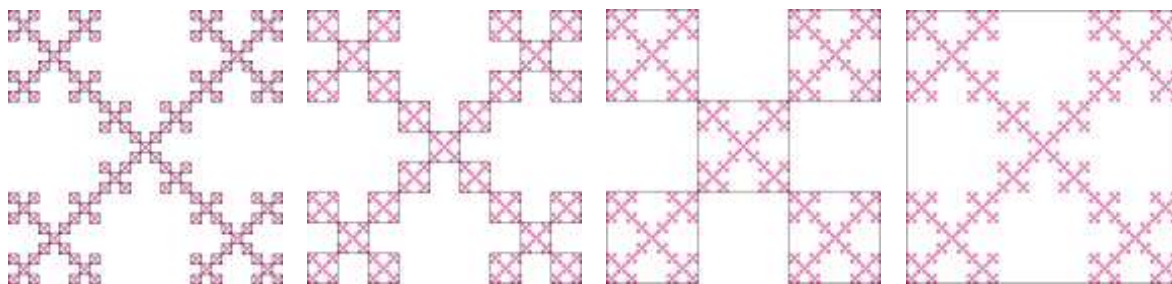
$$N = r^{-D}$$

де D — фрактальна вимірність. Зазвичай емпірична крива представлена на логарифмічному графіку. Отже, оцінка є лінійною регресією, а D — нахилом отриманої прямолінійної оцінки.

$$\log N = \log r^D = D \log r$$

Аналіз клітин

Аналіз клітин - це найпростіший метод, який можна використати для оцінювання фрактальної розмірності. Аналізований візерунок вкривається квадратичною сіткою. Розмір клітинок сітки r_i збільшується від одного етапу ітерації до наступного. Беручи до уваги розмір комірки сітки r_i , підраховують кількість комірок N_i , що містять принаймні одну точку (чорний піксель у випадку растрових даних; точку, лінію або полігон у випадку векторних даних).



$r: 9 \quad N = 125$

$r: 27 \quad N = 25$

$r: 81 \quad N = 5$

$r: 243 \quad N = 1$

Рис. 3.2. Клітинний метод обчислення фрактальної розмірності

Емпіричну криву, яку будують за монофрактального методу, оцінюють за допомогою регресії OLS (зазвичай методом найменших квадратів). Оцінений коефіцієнт D відповідає фрактальній розмірності. Є 2 типи регресії у фракталізі:

LOG: криву аналізували для використання лінійної моделі $\log y = D \log x + b$. Цей тип залежності використано за замовчуванням у геометричній послідовності.

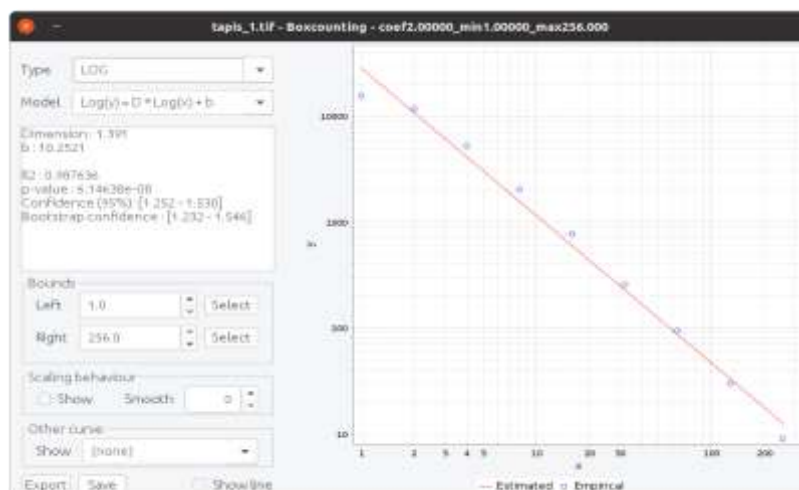


Рис. 3.3. Вікно оцінювання регресії

DIRECT: криву оцінюють за допомогою степеневої функції закону типу $y = axD$. Цей тип використовується за замовчуванням для арифметичної послідовності.

Частина графіка показує емпіричну криву у вигляді дискретних даних, а оцінену криву (регресійну модель) - червоною лінією.

Чисельні результати

- оцінена фрактальна розмірність (коефіцієнт D моделі)
- a, b, c : інші коефіцієнти залежно від обраної моделі
- R^2 : коефіцієнт визначення регресії r^2
- p -значення: значення регресії має бути меншим за 0,001
- довіра (95%): довірчий інтервал фрактальної вимірності на рівні 95%. Обчислюється лише для лінійної регресії.
- Bootstrap впевненість: довірчий інтервал фрактальної вимірності на 95%, оцінений Bootstrap. Обчислено для всіх моделей.

Обмеження

За замовчуванням регресія обчислюється для всіх точок емпіричної кривої. Користувач може видалити деякі точки на початку (ліворуч) або в кінці (праворуч) кривої. Регресія оновлюється автоматично, а також масштаб на карті.

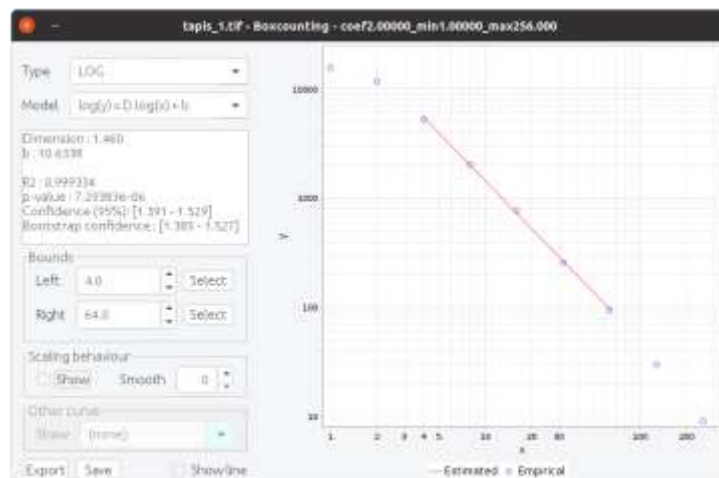


Рис. 3.4. Оцінка з обмеженнями, визначеними користувачем

Масштабування

Поведінка масштабування відповідає першій похідній логарифмічної емпіричної кривої. Він показує локальні оцінки фрактальної розмірності.

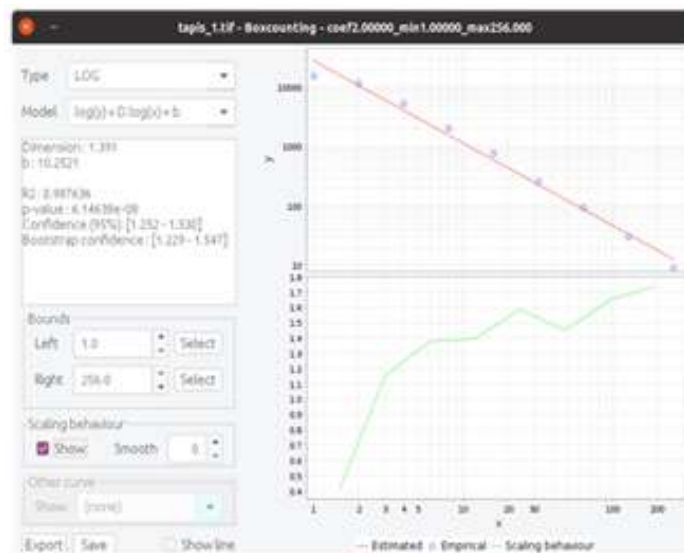


Рис. 3.5. Поведінка масштабування

Для апроксимації експериментальних даних із застосуванням теорії фракталів, емпіричну залежність $N(\epsilon) = \epsilon^D$ (де N - кількість елементів, а ϵ - масштабний коефіцієнт або розмір комірки) доповнюють модифікованими моделями для оцінки відхилень від строгої самоподібності (мультифрактальні або корекційні підходи).

Класичними трьома рівняннями для вимірювання відхилень є:

1. **Поліноміальна поправка (параболічна модель):** До базового закону додається квадратичний член для відображення зміни фрактальної розмірності в різних масштабах:

$$N(\epsilon) = \epsilon^D \cdot (1 + c \ln \epsilon)$$

Модель із характеристичним (зрізаним) масштабом:

Враховує обмеження фізичного розміру системи, де закон перестає працювати:

$$N(\epsilon) = \epsilon^D \cdot \exp(1 + c \ln \epsilon)$$

Ступенева функція з експоненціальним множником (модель модифікованої ентропії):

Застосовується для аналізу статистичних розподілів та вимірювання відхилень у структурі:

$$N(\varepsilon) = c \cdot \varepsilon^D \cdot \varepsilon^{bln\varepsilon}$$

Fractalyse забезпечує побудову емпіричної кривої за чотирма різними рівняннями, які є частковими випадками рівняння $N(\varepsilon) = \varepsilon^D$:

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

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

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

D – фрактальна розмірність;

c -фактор форми, який відповідає початковій точці осі Y та є комплексним індикатором локального відхилення обчисленого фрактального закону від експериментальних даних. Рівняння $N(\varepsilon) = \varepsilon^D + c$ програмний комплекс використовує за замовчуванням, як найпростіше.

Відомі авторські коди обчислення фрактальної розмірності, наприклад

Обчислимо фрактальну розмірність з використанням методу клітин

```
def calculate_fractal_dimension(vertices, depth):
    triangles = sierpinski_triangle(vertices, depth)

    box_sizes = []
    box_counts = []

    # Зменшити розмір клітини на кожному кроці
    for i in range(1, depth + 1):
        box_size = 1 / (2 ** i) # Розмер коробки для цього рівня
        box_sizes.append(box_size)

    # Підраховуємо кількість комірок для покриття фракталу.
    box_count = count_boxes(triangles, box_size)
    box_counts.append(box_count)

    # Застосовуємо логарифмічну регресію
    log_box_sizes = np.log(box_sizes)
    log_box_counts = np.log(box_counts)

    # Будуємо графік
    plt.figure(figsize=(8, 8))
```

```
plt.plot(log_box_sizes, log_box_counts, 'o-', label='Box counting')
plt.xlabel('log(Box Size)')
plt.ylabel('log(Box Count)')
plt.title('Fractal Dimension of Sierpinski Triangle')
plt.show()

# Розрахунок фрактальної розмірності як нахилу графіку
coefficients = np.polyfit(log_box_sizes, log_box_counts, 1)
fractal_dimension = coefficients[0]

return fractal_dimension
```

Гранична фрактальність площини - це явище, при якому межа геометричної фігури або області має дрібну розмірність, прагнучи заповнити площину. При цьому довжина кордону стає нескінченною, хоча сама фігура займає скінченну площу $[D]$ за динамічного навантаження зварних швів виконаних роботизованим методом, притаманная проведенням випробування повинна, бути нижчою, за критичні значення $D_{cr} = f(\sigma, T)$:

- Для нормальної лінії: $D = 1$.
- Для класичної плоскої фігури: $D=2$.
- Для фрактальної межі: $1 < D < 2$

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

де n_1 коефіцієнт запасу;

3.3. Визначення фрактальної розмірності і площі ділянок зношування поверхні підшипників ковзання

Вибір масштабного діапазону для аналізу

Фрактальна розмірність: основні поняття

Розмірність - це характеристика об'єкта, яка показує, скільки параметрів потрібно описати.

-нульова розмірність – точка. Вона не має довжини, ширини або висоти, тому її розмірність дорівнює нулю.

-одномірною розмірність – лінія. Вона має тільки довжину, і для опису точки на лінії потрібен один параметр, наприклад, координата.

-двовимірна розмірність – площа. Об'єкт має довжину та ширину. Щоб описати точку на площині, потрібні дві координати x і y

-тривимірна розмірність – простір. Воно включає довжину, ширину та висоту. Для визначення точки у просторі використовуються три координати: x , y та z .

Усі методи фрактального аналізу вимагають визначення діапазону шкал, які будуть розглядатися під час аналізу. Ця послідовність задається в панелі, що міститься в кожному аналізовому кадрі.



Рис. 3.6. Вибір діапазону гами

Діапазон масштабів розподіляється від мінімального до максимального розмірів. За замовчуванням послідовність масштабів є геометричною, тобто кожне значення масштабу множиться на значення Coef (починаючи з мінімального розміру). Коли обрана послідовність є арифметичною, значення Coef додається до кожного значення шкали. Для геометричної послідовності Coef є більшим за 1, для арифметичної послідовності Coef - більшим за 0.

Значення мінімального та максимального розмірів за замовчуванням автоматично оцінюються на основі вхідних даних. Для растрових даних мінімальний розмір - це розмір пікселя. Для векторних даних мінімальний розмір - це розмір найменшого елемента (багатокутника або лінійного відрізка). Значення максимального розміру за замовчуванням встановлюється як половина мінімального обсягу шару даних.

Для растрових даних масштаби потрібно округлювати до цілого

числа пікселів. Це може призвести до незначних відхилень від визначеної послідовності.

Меню підрахунку клітин

Спочатку слід встановити векторний шар, який розглядається, і визначити масштабний діапазон для аналізу. Також задають значення двох конкретних параметрів: кількості позицій сітки та View box. Наприкінці обчислення оцінена фрактальна розмірність відображається у фреймі оцінювання, і додається новий шар, що відображає діапазон масштабу внизу карти.

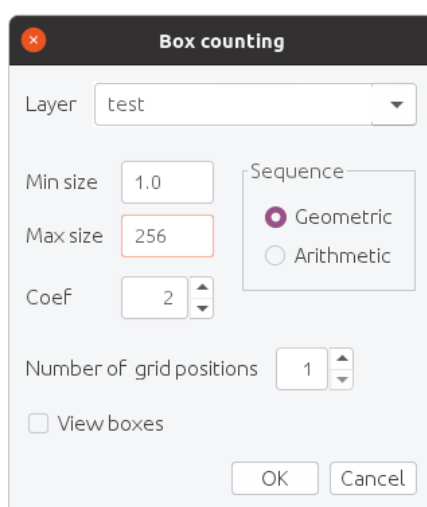


Рис. 3.7. Діалогове вікно підрахунку клітин

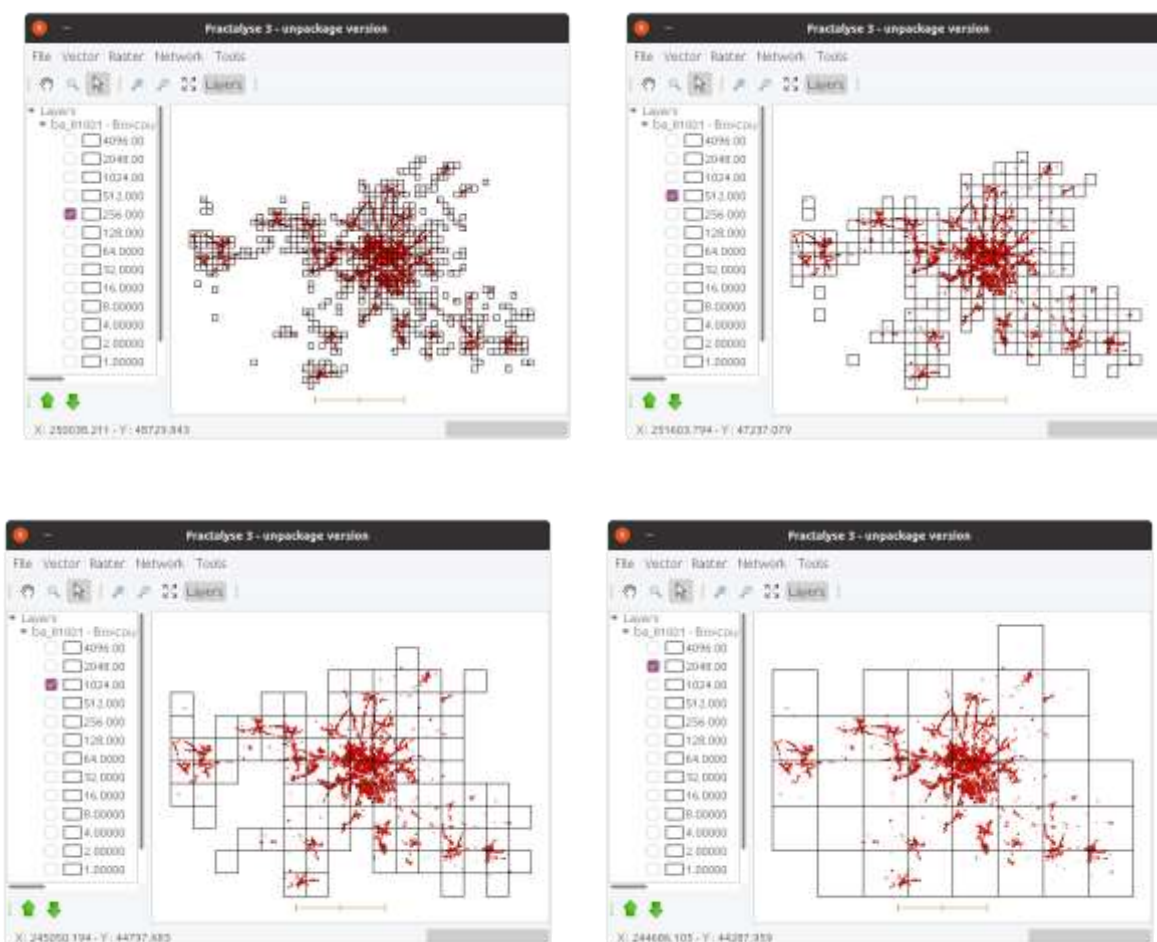
Кількість комірок сітки

На кожному кроці ітерації перевіряється обрана кількість комірок сітки, і враховується кількість елементів N_i для кожної позиції сітки. Відповідне положення сітки відповідає найменшому значенню N_i .

Вікна перегляду

Якщо поставите галочку в опції «Переглянути поля», всі поля з даними зберігаються на кожному кроці ітерації і можуть відображатися на карті; по одному шару для кожного масштабу.

Зверніть увагу, що ця опція потребує багато пам'яті.



Розмір коробки: 256

Розмір коробки: 512

Розмір коробки: 1024

Розмір коробки: 2048

Рис. 3.8. Підрахунок комірок- Перегляд комірок

Меню дилатації

Спочатку слід встановити векторний шар, який розглядають, і визначити масштабний діапазон для аналізу. Далі встановлюють значення двох конкретних параметрів: зупинитися на одному кластері та переглянути розширені патерни. Наприкінці обчислення оцінена фрактальна розмірність відображається у фреймі оцінки, і додається новий шар, що відображає діапазон масштабу внизу карти.

У вікні оцінки крива кількості кластерів за кожним розміром дилатації також може відображатися в панелі Other curve.

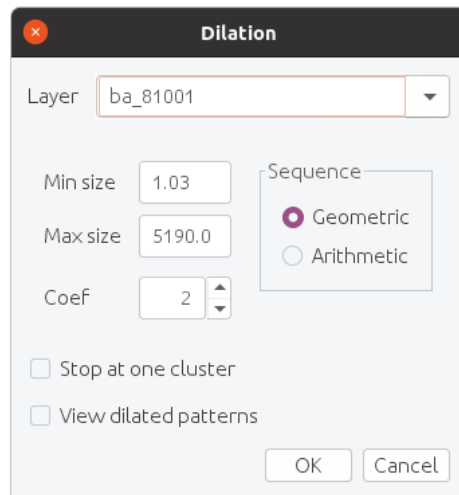
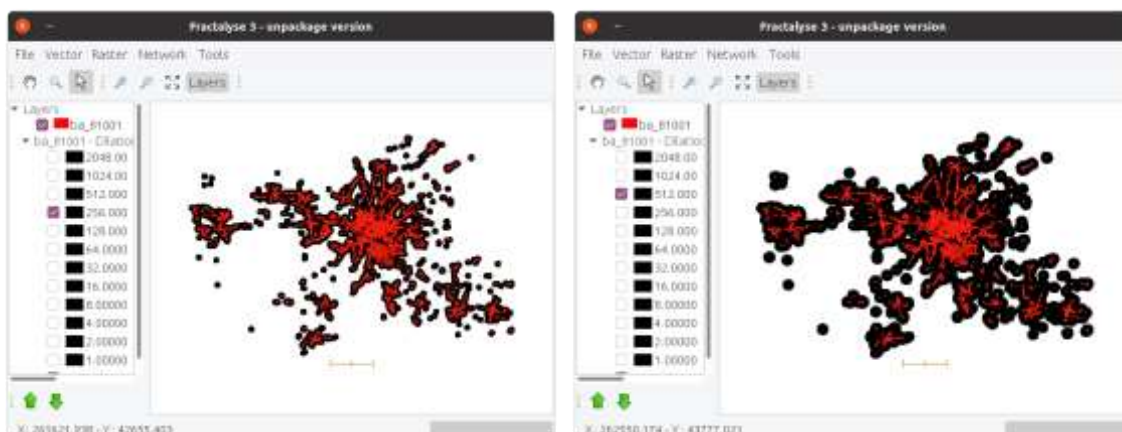


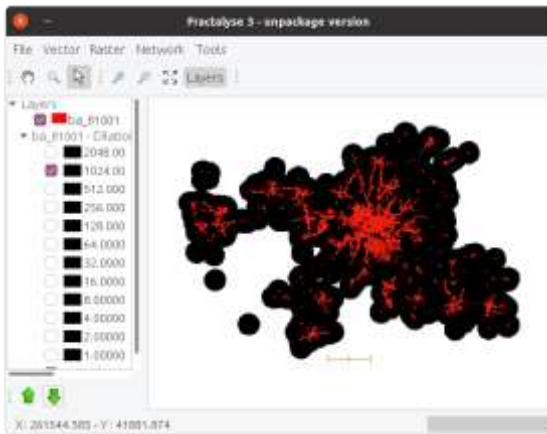
Рис. 3.9. Діалогове вікно дилатації

Якщо користувач обирає Stop на одному з кластерних варіантів, дилатація припиняється, коли розширений візерунок складається з одного багатокутника.

Перегляд розширених візерунків

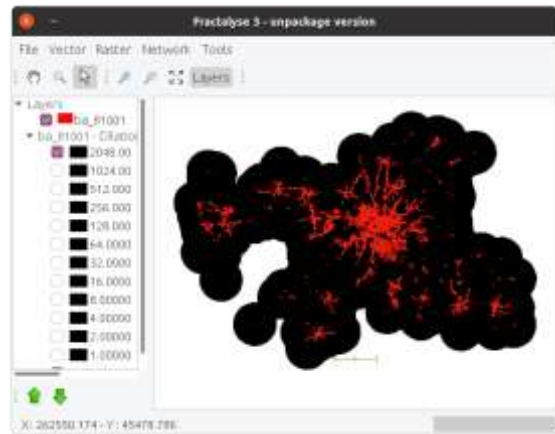
Якщо користувач обирає опцію «Переглянути розширені візерунки», розширені геометрії зберігаються на кожному кроці ітерації і можуть відображатися на карті; по одному шару для кожного масштабу. Зверніть увагу, що ця опція може вимагати значної кількості пам'яті, оскільки всі розширені геометрії зберігаються.





Розмір розширення: 256

Розмір розширення: 1024



Розмір розширення: 512

Розмір розширення: 2048

Рис. 3.10. Дилатація - Вигляд розширених візерунків

Меню кореляції

За векторною кореляцією можна аналізувати лише точкові дані. Аналіз ліній або полігонів спочатку вимагає растеризації даних, а потім аналізу за растровою кореляцією.

Спочатку потрібно встановити векторний шар, який розглядається, і визначити діапазон масштабів для аналізу. Наприкінці обчислення оцінена фрактальна розмірність відображається у фреймі оцінки, і додається новий шар, що відображає діапазон масштабу внизу карти.

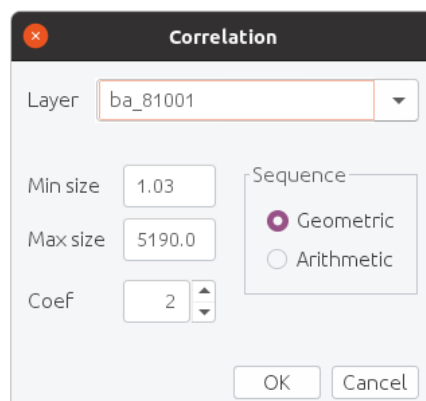


Рис. 3.11. Діалогове вікно кореляції

Радіальне меню

Спочатку потрібно встановити векторний шар, який розглядається, і визначити діапазон масштабів для аналізу. Також слід встановити значення одного конкретного параметра: центру, що відповідає початковій точці процесу підрахунку. Координати можна ввести безпосередньо або встановити, натиснувши на карту.

Наприкінці обчислення оцінена фрактальна розмірність відображається у фреймі оцінки і додається новий шар, що відображає масштабний діапазон на карті.

Одиниця підрахунку залежить від типу геометрії векторного шару:

- пунтал: кількість точок;
- лінійна: довжина;
- полігональна: площа.

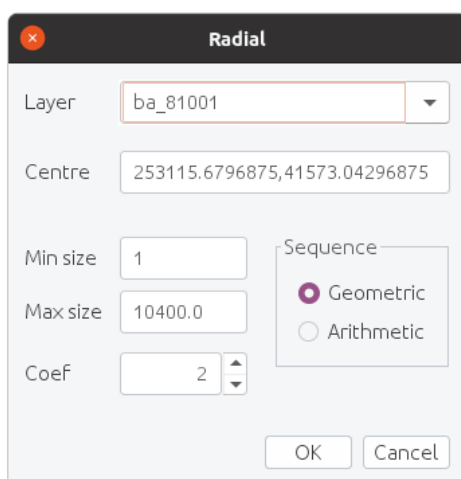


Рис. 3.12. Радіальне діалогове вікно

Пакетне меню

Векторні методи можна виконувати у пакетному режимі на кожній підподібній області векторного шару. Підкласти можна визначити регулярною сіткою або іншим багатокутним шаром.

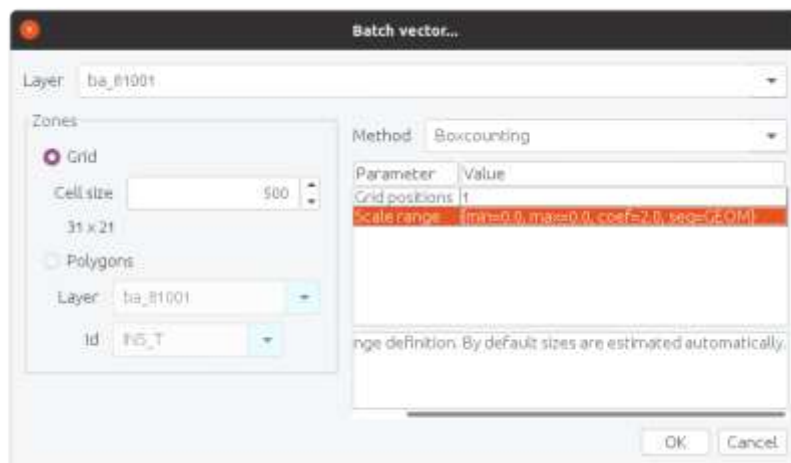


Рис. 3.13. Пакетне діалогове вікно

Кожен отриманий багатокутник містить фрактальну розмірність у своїх атрибутах, а також довірчий інтервал і r_2 .

Фрактальну геометрію успішно використовують для характеристики топографії поверхні та її опорної здатності, а також для моделювання механіки поверхневого контакту. У цій кваліфікаційній роботі зроблено припущення, що фрактальну геометрію також можна використовувати для аналізу процесів зношування.

Наша модель фрактальної геометрії для прогнозування зношування дає результати, що узгоджуються з експериментальними спостереженнями. За допомогою цієї моделі було виявлено, що існують дві області D , які мають різну поведінку швидкості зношування. В одній області швидкість зношування значно зменшується зі збільшенням D , а в другій — вона дещо зростає. Ми пояснили ці явища, використовуючи опорну здатність поверхні контакту та різкість нерівностей. Наша модель також передбачає, що швидкість зношування є монотонним фізичним процесом, без біфуркацій.

Використано 2D з різними полями зображення. Під час одержання зображення потрібне використання камери з 2D-функціоналом, оскільки 2D-функція використовується для його захоплення. Датчик ToF випромінює модульоване інфрачервоне світло, яке відбивається від навколишніх поверхонь. Вимірюючи різницю в часі між випромінюваним і реагуючим світлом, відстань визначається з високою точністю. Одержане зображення становить хмару

точок, в якій колір кожного пікселя представляє відстань до першого зустрічного об'єкта, як показано.

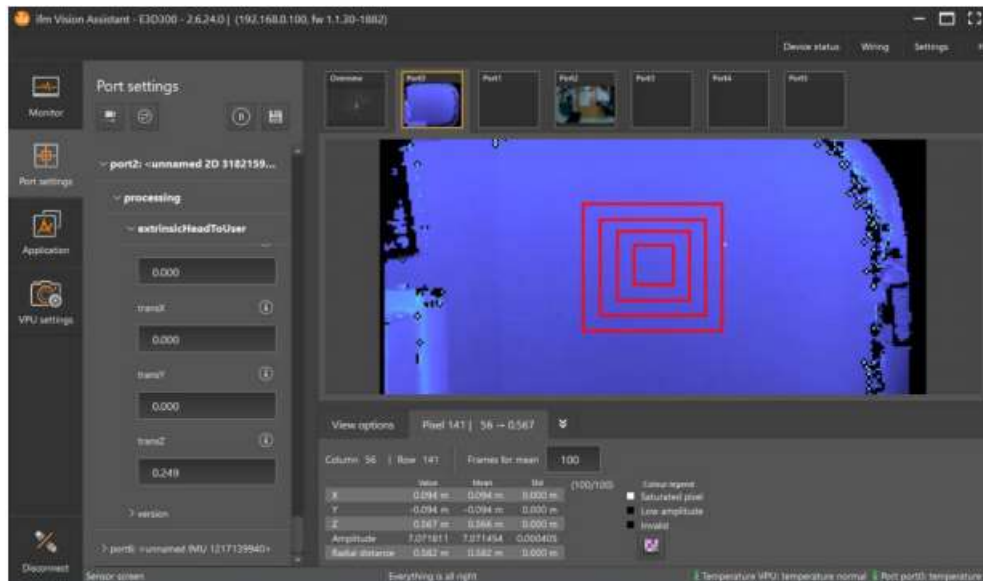


Рис. 3.14. Зображення досліджуваного периметру поверхні вкладиша підшипника ковзання

Калібрування камери для макрозйомки полягає у визначенні масштабу збільшення, робочої відстані та добірї параметрів для отримання чіткого зображення . Вона допомагає уникнути оптичних спотворень та розрахувати точні фізичні розміри об'єктів на матриці.

Для макрозйомки важливими є три параметри: масштаб збільшення (M), фокусна відстань об'єктива (f) та відстань до об'єкта (u).

Масштаб збільшення (M): показує, скільки разів розмір об'єкта на матриці дорівнює його реальному розміру. Якщо об'єкт 10 мм займає 10 мм на матриці, масштаб дорівнює 1:1 (або 1x).

$M = \text{розмір об'єкту на сенсорі} / \text{реальний розмір об'єкту} = v / u$,
де v — відстань від об'єктива до матриці (задня фокусна відстань); u - відстань від об'єкта до об'єктива (робоча відстань).

Ефективне діафрагмове число N_{eff} : при макрозйомці ефективна діафрагма темніша за встановлену через розтягування хутра об'єктива. Це важливо для розрахунку витримки.

$$N_{\text{eff}} = N \times (1 + M)$$

де N — значення діафрагми на камері.

Вихідні дані об'єкта:

Фотографували вкладищі шириною 21 мм у масштабі $M = 1:1$ (коефіцієнт дорівнює 1).

Фокусна відстань макрооб'єктива $f = 100$ мм.

Розрахунок дистанції фокусування: Для симетричного об'єктива при масштабі 1:1 фокусна відстань удвічі збільшується для забезпечення чіткості.

Відстань до об'єкта: $u = 2 \times f = 200$ мм.

Відстань від об'єктива до матриці: $v = 2 \times f = 200$ мм.

Загальна дистанція від об'єкта до сенсора камери становитиме 400 мм (200 + 200).

Розрахунок ефективної діафрагми та експозиції:

На камері встановлено діафрагму $f/8$. Через висування лінзи світло втрачається, тому ефективна діафрагма буде іншою:

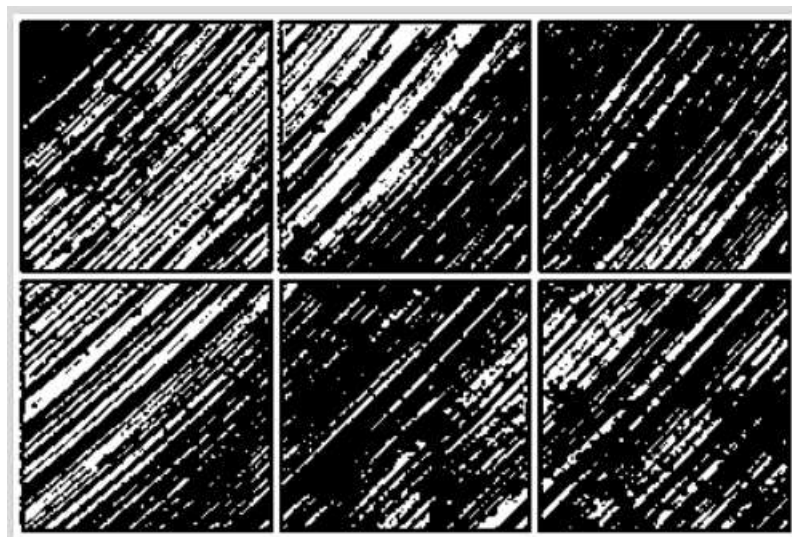
$$N_{eff} = 8 \times (1+1) = f / 16,$$

Отже, світла потрапить у 4 рази менше, і потрібно скоригувати ISO або витримку (наприклад, вибрати 1/200 с замість 1/50 с).

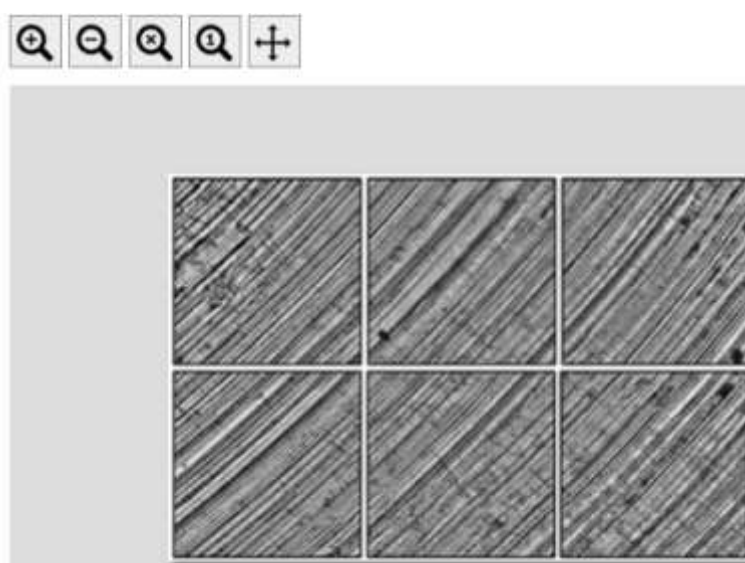
Бінаризація – це метод обробки даних та зображень, який перетворює безперервні, градаційні або кольорові дані у простий двійковий формат, що зазвичай складається лише з нулів та одиниць. Це спрощує складність, дозволяючи системам швидше обробляти інформацію, використовувати менше місця для зберігання та досягати чіткого розмежування між переднім планом та фоном.



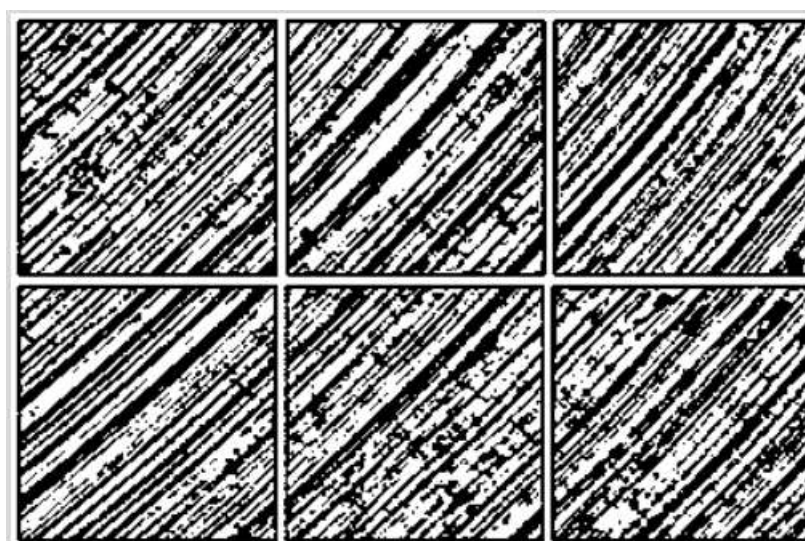
а



б



в



г

Рис. 3.14. Фотозображення та бінаризовані фотозображення поверхонь тертя

Зв'язок фрактальної розмірності D і морфології поверхні тертя полягає в тому, що D є кількісним показником «хаотичності», шорсткості та самоподібності мікрорельєфу. Чим вище значення D , тим складніша, порізаніша і більш розвинена поверхня, що безпосередньо визначає коефіцієнт тертя, інтенсивність зносу та ресурс вузла. Ключові аспекти взаємозв'язку: характер зносу та фрактальна розмірність. У процесі приробітку або тертя вихідний профіль металу деформується. Залежно від режимів, морфологія перетворюється на новий фрактальний стан: за жорсткіших умов чи руйнації профіль стає більш хаотичним, що збільшує його розмірність.

Мікроконтакт та тертя: Фрактальний аналіз показує, що фактична площа контакту залежить від профілю нерівностей. Якщо поверхня має високу фрактальну розмірність, фактичний контакт відбувається на більшій кількості мікровиступів. Взаємозв'язок між ухилом нерівностей і фрактальною розмірністю визначає силу тертя та коефіцієнт ковзання.

Самоорганізація: У трибосистемах шорсткість прагне оптимального фрактального стану, у якому забезпечується мінімальний знос (концепція самоорганізації тертя).

Метод кількісної характеристики узгодження поверхонь пари тертя може кількісно охарактеризувати стан припрацювання та узгодження поверхні пари тертя. Він також може бути використаний як один із критеріїв оцінки стану припрацювання поверхні пари тертя. Він може ефективно контролювати зміни стану поверхні пари тертя під час процесу припрацювання, що допомагає прогнозувати тенденцію зносу та оптимізувати процес припрацювання.

Метод кількісної характеристики контакту поверхонь пари тертя, запропонований у цій кваліфікаційній роботі на основі автоматизованого аналізу вкладишів двигуна KIA Соренто 2.4 (площа аналізованих зображень вкладишів 5x5 мм) є здійсненним і дуже практичним. Він може не лише кількісно характеризувати стан припрацювання та збіг поверхонь пари тертя, а й бути простим у використанні: його легко впроваджувати та застосовувати в

інженерній практиці.

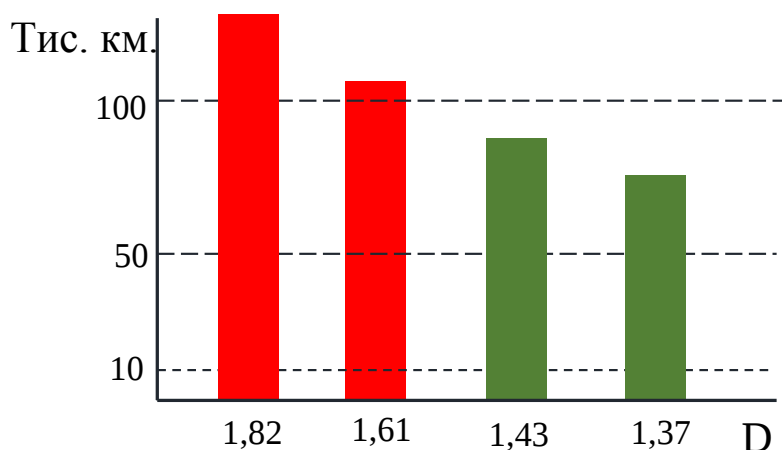


Рис. 3.15. Фрактальна розмірність поверхні тертя вкладища ДВЗ KIA Соренто 2.4, (площа аналізованих зображень вкладишів 5x5 мм)

На основі фрактальної теорії систем тертя, фрактальну розмірність кривої профілю поверхні пари тертя можна точно та інтуїтивно отримати за допомогою теоретичного розрахунку за формулою. Фрактальні параметри, що не залежать від розміру, використовуються для кількісної характеристики подібності поверхонь тертя, долаючи проблему кореляції розмірів у результатах вимірювань традиційними методами та підвищуючи точність оцінки відповідності поверхонь пари тертя.

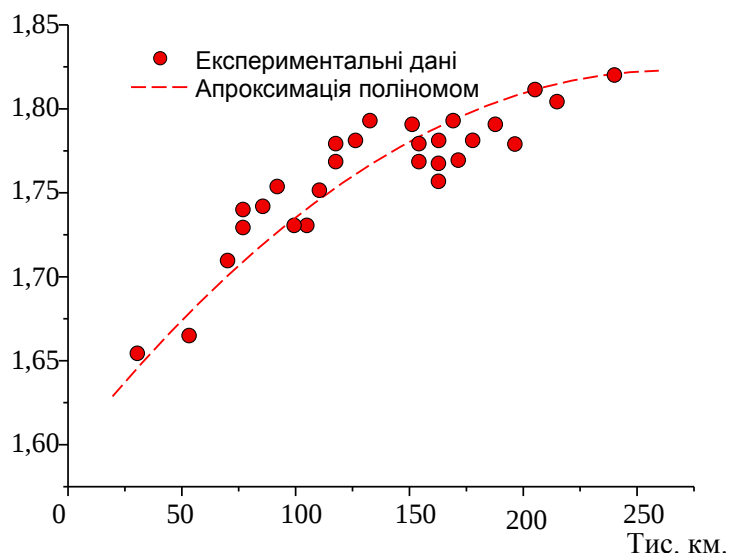


Рис. 3.16. Взаємозв'язок D поверхні вкладиша від довжини пробігу, тис. км, KIA Соренто 2.4 (площа аналізованих зображень вкладишів 5x5 мм)

Довговічність вкладишів двигуна (ресурс 200–300 тис. км) критично

залежить від якості і тиску масла, теплового режиму мотора, а також від навантажень і правильності підбору деталей. Ідеальний масляний клин повинен повністю виключати контакт металу з металом.

Морфологія дослідженої поверхні, шорсткість поверхні та інші характеристики пар тертя безпосередньо впливають на коефіцієнт тертя, швидкість зносу та стан змащення контактної поверхні. Традиційні методи характеристики стану поверхні, такі як оптична мікроскопія, інтерферометрія білого світла або атомно-силова мікроскопія, можуть забезпечити інтуїтивно зрозумілі зображення морфології поверхні або кількісні дані про шорсткість, але мають певні обмеження. Зокрема, під час характеристики поверхневих особливостей традиційні методи вимірювання часто спираються на вибрану шкалу, але морфологія поверхні показуватиме різні характеристики в різних масштабах. Тому, при використанні лінз з різним збільшенням або вимірюванні з різною роздільною здатністю результати вимірювання будуть різними. Ця залежність від масштабу призводить до помилок у результатах вимірювання, особливо в ситуаціях, коли потрібна точна характеристика відповідності поверхні. Ця помилка може мати значний вплив на проектування та оцінку продуктивності механічних систем. Крім того, традиційні параметри шорсткості поверхні, такі як R_a , R_z тощо, можуть надати лише обмежену інформацію про характеристики поверхні та не можуть повністю відобразити складність та динамічні зміни морфології поверхні, особливо закон еволюції поверхні пар тертя під час процесу припрацювання та характеристики узгодження подвійних поверхонь

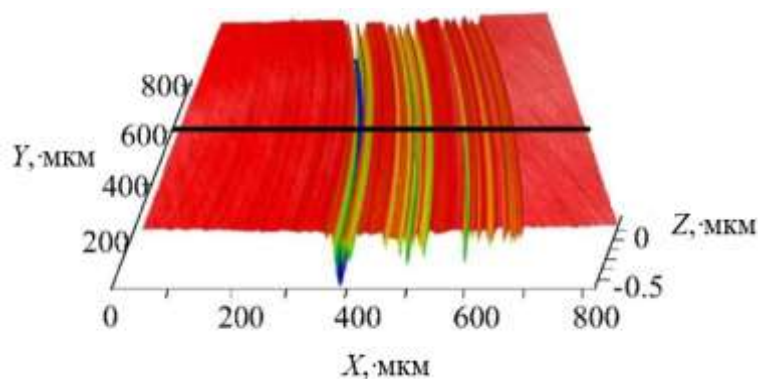


Рис. 3.17. Фрагмент поверхні вкладиша з подряпинами

Фізична інтерпретація фрактальних геометричних параметрів

Фрактальна геометрія розкриває природні властивості випадкових та непередбачуваних явищ. Фрактальна розмірність D є найважливішим аспектом фракталів. Для характеристики топографії поверхні фрактальні параметри можна пов'язати зі звичайною концепцією, нормованою кривою площі опори. З нашого моделювання та експериментів з фрактальними поверхнями ми дійшли висновку, що якщо D збільшується або топофезія L зменшується, нормалізована крива площі опори зміститься вище, як показано на рис. 1, і що D має більший вплив на нормалізовану криву площі опори, ніж L . Криву площі опори можна розглядати як індикатор здатності контактної підтримки, де під здатністю контактної підтримки ми розуміємо потенціал поверхні для створення значних площ інтерфейсу при контакті з іншими поверхнями. Таким чином, фрактальна розмірність може представляти криву площі опори, яка використовується в звичайному аналізі для вивчення поверхневого контакту та знос, і він є більш лаконічним та практичним, оскільки забезпечує просту кількісну міру 01 контактної підтримуючої здатності поверхонь: чим більше значення фрактальної розмірності, тим сильніша контактна підтримуюча здатність.

Просторові та часові корелятори показали яскраво виражені масштабно-інваріантні залежності, що утворюються на кінцевій стадії процесу, що свідчить про те, що принаймні для вивчених матеріалів стан матеріалу перед руйнуванням задовольняє умовам самоорганізації. Спостерігається синхронна зміна просторового та тимчасового скейлінгу при наближенні на момент руйнування зразка. Посилення низькочастотної складової акустичного шуму з наближенням до руйнування матеріалу свідчить про зростання ролі великомасштабних флуктуацій на кінцевій стадії процесу.

Чи існує єдиний механізм руйнування матеріалів? Той факт, що кінцевим передрозривним станом матеріалу може бути стан СІК, статистичні властивості якої визначаються фундаментальними просторово-часовими характеристиками, а не мікроструктурою матеріалу, свідчить на користь такої гіпотези. При цьому в процесі руйнування в матеріалі відбувається еволюція дефектної структури на

більш високих масштабних рівнях, в результаті якої матеріал вичерпує всі можливості опору руйнуванню. Тоді й відбувається втрата всіх характерних просторових та тимчасових масштабів дефектної структури. З іншого боку, сьогодні немає єдиного погляду на те, що процес самоорганізації поверхонь тертя відбувається однаково у всіх матеріалах. Це пов'язано з тим, що не можна однозначно сказати, чи скейлінгові показники, що визначають масштабно-інваріантні властивості (зокрема фрактальна розмірність руйнування), універсальними константами або ці величини залежать від властивостей конкретного матеріалу.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Правильна організація освітлення робочого місця – один із найважливіших факторів ефективності роботи будь-якого підприємства чи офісу. І це не фігура мови! Щоб переконатися в цьому, фактор впливу світла розкладемо на складові. Що ж на виробництві залежить від світла, безпосередньо чи опосередковано:

Продуктивність праці. За рівномірного світла достатньої інтенсивності працівники менше втомлюються і рідше роблять помилки. Та й працюють швидше. Особливо зростає роль освітлення на складальних лініях та під час виконання точної роботи (наприклад, у механоскладальному цеху).

Безпека співробітників. Хороше освітлення допомагає знизити травматизм і ризик нещасних випадків, особливо під час роботи з устаткуванням, на висоті або в складських зонах.

Якість продукції. Висвітлення на робочому місці впливає на точність роботи, а також дає змогу вчасно помічати дефекти та, за можливості, їх усувати. Менше шлюбу на виході – вища стабільність виробництва.

Енергоефективність та економія. Якщо порівнювати з традиційними системами освітлення, сучасні LED-світильники споживають у рази менше енергії, вимагають мінімального обслуговування та слугують довше - що в комплексі знижує як накладні витрати на освітлення, так і експлуатаційні.

Дотримання норм та стандартів. Правильне освітлення на виробництві допомагає без проблем проходити перевірки та сертифікацію, знижує ризик накладення штрафів і розпоряджень (мінус ще один головний біль власника бізнесу).

Психологічний комфорт. Приємне, природне світло покращує загальний мікроклімат у колективі співробітників – працівники краще почуваються, менше втомлюються і рідше хворіють.

Є ще один не зовсім явний аспект хорошої організації освітлення – імідж вашої компанії: сучасне, якісне освітлення підкреслює турботу про співробітників і побічно підвищує довіру до вашого бізнесу.

Стандарти освітлення виробничих площ

Стандарти освітлення на виробництві – це вимоги, встановлені нормативними документами, до рівня та якості освітлення в робочих зонах. Стандартизація, спрямована на забезпечення безпечних та комфортних умов праці, у свою чергу сприяє підвищенню ефективності бізнесу.

В Україні стандарти освітлення традиційно регулюються такими документами, як ДБН, БНіП, ГОСТ, а також міжнародними нормами EN та ISO (залежно від галузі). З 2002 року на Україну поширюється міжнародний стандарт освітлення – ISO 8995, який регламентує нормативи, основні параметри освітлення виробничих площ залежно від сфери застосування:

Норма освітленості (Люкс). Регламентує кількість світла на різних виробничих ділянках - на робочому місці, в проходах, на складах і т.д.

Рівень яскравості від світильника – UGRL (Unified Glare Rating Limit) . Чим нижче коефіцієнт, тим комфортніші для людського зору умови: UGRL менше 16 – комфортне для точних робіт світло (не сліпить очі відблисками), UGRL – 22 і більше – допустимо тільки в технічних зонах, складах, де персонал не працює постійно.

Індекс кольору (Ra або CRI) . Показує, як точно освітлення передає кольори. Це особливо важливо для точних робіт та у виробництві, де потрібен візуальний контроль (харчове виробництво, наприклад) – рекомендується Ra від 80 умовних одиниць.

Колірна температура світла (K) . Зазвичай використовується нейтральне (4000–5000 K) або холодне біле світло (6000 K і вище), щоб забезпечити хорошу видимість і концентрацію уваги під час робочого процесу.

Важливо, що стандарт ISO 8995:2002 регламентує параметри освітлення для різних сфер виробництва стосовно приміщень різного типу: наприклад, норма освітленості (Еср) на робочому місці збирача в машинобудуванні становить 300 Лк, у харчовій промисловості – 500 Лк, в швейному цеху – більше. Насправді це мінімальні вимоги до освітленості – у кожному окремому випадку інтенсивність світла на робочому місці може бути збільшена.

Аварійне освітлення

При проектуванні освітлення необхідно враховувати можливість

виникнення позаштатних ситуацій. Аварійне освітлення забезпечує безпечний вихід людей у разі відключення основного світла. Ці спеціальні таблички зі стрілкою-показчиком потрібно на шляхах евакуації, у щитів, верстатів, в зонах підвищеної небезпеки. Аварійне освітлення має автоматично вмикатися та забезпечувати світло мінімум 1 Лк на рівні підлоги та автономно працювати мінімум 1 годину при відключенні основного електроживлення.

Ви просто не зможете законно запустити виробництво, якщо аварійне освітлення не відповідатиме чинним нормативам (або сплачуємо штраф). Організацію освітлення у виробничій сфері в Україні зараз регламентують будівельні норми ДБН В.2.5-28:2018 «Природне та штучне освітлення» (дуже докладний та об'ємний документ!). Цей стандарт встановлює, зокрема, вимоги до проектування/експлуатації аварійного освітлення в будівлях різного призначення.

Дотримання стандартів освітлення полегшує ведення бізнесу та загалом ваше життя. І тому є низка причин:

- підвищується ефективність виробництва та якість продукції загалом – це пряма вигода.
- поліпшуються умови праці, знижується травматизм, робочий процес стає стабільнішим – теж вигідно виробництву.
- мінімізація штрафів та простоїв: відповідність нормам допомагає пройти всі можливі перевірки та уникнути санкцій контролюючих органів (тут навіть коментарі не потрібні).

Ось і виходить, що дотримання стандартів висвітлення – це не лише вимога законодавства, а й розумний крок до покращення робочих процесів на підприємстві.

Ці стандарти легко співвіднести з вибором освітлення в будь-якій сфері виробництва: орієнтуючись на стандарти освітленості ($E_{ср}$, Лк) можна для конкретного робочого місця планувати вибір світильників – їх тип, моделі та кількість.

Світильники для виробничих приміщень

Оптимальним рішенням для використання у виробничому секторі,

звичайно, є світлодіодні системи. LED промислові світильники за всіма показниками значно перевершують традиційні типи ламп, які давно застаріли як морально, так і технічно:

- мають максимально високий ККД – до 95%. Тільки 5% витраченої електроенергії перетворюється на тепло, у середньому з виробництва дають до 70% економії електроенергії.

- термін служби LED-систем становить від 50 000 годин і вище - у 5–10 разів довше, ніж у традиційних світильників.

- світлодіоди стійкі до вібрацій, пилу, вологи, перепадів температур - усім тим чинникам, що нерідко присутні на промисловому виробництві та явно «не сприяють» роботі традиційних освітлювальних пристроїв.

- LED освітлювальні прилади вмикаються миттєво, на відміну від газорозрядних ламп.

- іодні лампи забезпечують стабільне та рівномірне світло без мерехтіння навіть за нестабільної напруги в мережі.

Завдяки різноманітності форматів і характеристик світлодіодні світильники легко адаптуються до будь-яких виробничих умов. Сучасна промисловість випускає для потреб промислового сектору широкий вибір LED-освітлювальних пристроїв – можна знайти відповідне рішення для будь-яких типів виробничих приміщень. Кожен з типів LED промислових світильників має свої особливості та сфери застосування:

Лінійні світлодіодні світильники – один із найпоширеніших варіантів промислового освітлення. LED Linear лампи використовуються для освітлення цехів, виробничих ліній, ділянок точного збирання, коридорів та складських приміщень зі стелями висотою до 5м. Лінійні LED світильники легко монтуються в ряд і тим самим створюють безперервну світлову лінію вздовж робочої зони. Рівномірне світло без тіней від лінійних світильників забезпечує хорошу видимість на робочих місцях, що дуже важливо для виконання точних робіт і конвеєрних операцій. LED Linear світильники цінуються за простий монтаж і обслуговування. За бажанням їх можна встановити в накладному варіанті, вбудованому в площину стіни/стелі або на підвісах. А при

використанні спеціальних з'єднувачів можна зібрати світлову магістраль з однією точкою підключення – такий варіант використання лінійних світильників ідеально підходить для освітлення великих виробничих площ та логістичних центрів.

Купольні LED-світильники використовуються у виробничих цехах, ангарах та інших приміщеннях із високими стелями (від 6 м). Завдяки параболічній формі відбивача, формується потужний світловий потік – LED-світильник типу High Bay якісно освітлює великі площі з висоти підвісу до 20 м! При цьому світильники для високих прольотів забезпечують максимальну видимість навіть у найвіддаленіших темних кутах великих просторів. Дзвоніві LED світильники часто мають посилений захист від пилу та вологи, оскільки умови їх використання мало відрізняються від вуличних. Виготовляють купольні світильники переважно з металу (сплави алюмінію), що гарантує додаткову міцність і надійність в експлуатації.

LED-світильники з підвищеним пиловологозахистом (IP65, IP66 і вище). Пиловологозахищені LED-світильники IP65/IP66 використовуються там, де звичайні лампи швидко виходять з ладу (підвищена вологість і вміст пилових частинок, агресивне довкілля, різкі перепади температур тощо). Герметичний корпус цих захищених освітлювальних пристроїв надійно захищає внутрішні компоненти від потрапляння води та пилу, що забезпечує тривалий термін служби та стабільну роботу світлодіодів у складних умовах. Ці світильники призначені для використання у харчовій промисловості, на СТО та автомийках, у теплицях, с/г-приміщеннях та ін.

Вибухозахищені LED-світильники (Ex-серія) мають посилений захист корпусу від іскор та нагріву, які можуть спричинити вибух і пожежу. Використання Ex-світильників відповідає суворим стандартам безпеки для виробництв нафтохімічної галузі, на складах ПММ, у лакофарбових цехах та інших вибухо- і пожежонебезпечних зонах.

LED робочі світильники використовуються на виробництві там, де потрібна хороша видимість на невеликій ділянці – операційна зона верстата, зона «лапки» у швейної машини та ін. Яскраве сконцентроване освітлення

робочої зони підвищує точність обробки та безпеку оператора. Виглядає локальний LED-світильник як настільна лампа з спрямованим світлом. Часто регулюється як напрям світлового потоку, а й його інтенсивність.

Аварійні LED-світильники на будь-якому виробництві — обов'язковий елемент системи безпеки. Виглядає такий світильник як табличка-вказівник «Аварійний вихід», часто у вигляді стрілочки. Аварійний LED-показчик вмикається при відключенні електрики в будівлі, для чого світильник оснащений автономним живленням (акумулятором на 1–3 години роботи). Встановлюється аварійне освітлення на сходах і в коридорах. Основне призначення аварійного освітлення — спрацювати у разі НП та забезпечити безпечний вихід людей із приміщення.

ВИСНОВКИ

Дослідження поверхонь підшипників ковзання після експлуатації свідчать, що поверхні мають розвинений рельєф та є фрактальними об'єктами. На підставі виконаних досліджень встановлено:

- фрактальна розмірність мікропрофілю зношених поверхонь може бути однією з важливих характеристик, яка залежить від умов тертя;

- аналіз зображень зношених поверхонь та визначення на його основі показника Херста дозволяє оцінити характер мікрорельєфу з точки зору періодичності (регулярності) та «зашумленості», а також визначити фрактальну розмірність;

Серія експериментів з автоматизованого визначення фрактальної розмірності поверхні вкладишів підшипників ковзання підтверджує застосовність таких методів для діагностування граничного стану та встановлення причин пошкодження. Обчислені фрактальні розмірності, що виникають у результаті цих аналізів, мають певну спільність для досліджених поверхонь і їхніх профілів.

Загалом, вищу розмірність спостерігали у зразках, що зазнали динамічного продавлювання та зсуву, порівняно зі зразками, які руйнувалися під час стирання.

Одержані результати доводять, що фрактальні методи математичної абстракції перетворилися на ефективний інструмент для розв'язання практичних завдань оптико-цифрової діагностики. Їх застосування дозволяє вийти на новий рівень діагностування та експлуатації - від оцінювання поверхонь із певними функціональними властивостями та точного прогнозування зносу до моделювання процесів руйнування та інтеграції в інтелектуальні системи управління життєвим циклом автомобільної техніки.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Закієв В.І. Прилад безконтактного вимірювання геометричних параметрів поверхні виробів методом інтерферометрії, Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.01 – прилади та методи вимірювання механічних величин. – Національний авіаційний університет МОН України, Київ, 2019.
2. Юнак О.М. Методи побудови та обробки фрактальних зображень з використанням рандомізованої системи ітераційних функцій, Дисертація доктора філософії зі спец. 172 – Телекомунікації та радіотехніка, Львів, Національний університет «Львівська політехніка», 2023 226.
3. Юнак О. М., Стрихалюк Б. М., Климаш М. М., Ефективність рандомізованою системою ітераційних функцій над детермінованою системою ітераційних функцій при побудові фрактальних зображень з обмеженою роздільною здатністю”, Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах, 2023. - №. 1, С. 5–12.
4. Волчук В. Н. К применению фрактального формализма при ранжировании критериев качества многопараметрических технологий // Металлофизика и новейшие технологии. – 2017. – Т. 39. – № 7. – С. 949-957.
5. Стринадко М.Т. Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Основи теорії систем». Чернівці : Чернів. національний університет імені Юрія Федьковича, 2022. – 162 с.
6. Подчашинський Ю. О., Чепюк Л. О. Порівняння фрактального і вейвлетного підходів до стиснення зображень. Тези доповідей XI Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційно-комп’ютерні технології – 2020 (ІКТ-2020)», (м. Житомир, 09 - 11 квітня 2020 р.). Житомир: Житомирська політехніка, 2020. С. 129-130.
7. Інтелектуальне моделювання нелінійних динамічних процесів у системах керування, кібербезпеки, телекомунікацій: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна ; за заг. ред. В.І. Корнієнка, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 536 с.

8. Morency C., Chapleau R. Fractal geometry for the characterisation of urban-related states: Greater Montreal Case // HarFA - Harmonic and Fractal Image Analysis (e-journal). - 2003. - P. 30-34, <http://www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci> (www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci/download_ejournal/09). HARFA, Harmonic and Fractal Image Analyser, Software for the Determination of Fractal Dimension, www.fch.vutbr.cz/lectures/imagesci.
9. Bourke P. Fractal Dimension Calculator. — local.wasp.uwa.edu.au/~pbourke/fractals/fracdi.
10. Мар'єнко Н.І., Степаненко О.Ю. «Фрактальний аналіз зображень у медицині та морфології: базові принципи та основні методики» // Morphologia. 2021, T.15 No 3, С.196-206.
11. Хусаїнов Д. Я., Шатирко А. В. Основи нелінійної динаміки: Посібник для студентів спеціальності «Прикладна математика». Київ: Видавничо-поліграфічний центр "Київський університет", 2017. - 159 с.
12. Кветний Р. Н., Богач І. В., Бойко О. Р., Софіна О. Ю., Шушура О. М. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень. Частина 2: навчальний посібник – Вінниця : ВНТУ, 2013. – 235 с.
13. Мартинов В., & Тайчан Д. Фрактальна структура як носій інформації про властивості матеріалу. Наука та будівництво, 2025, 44(2). <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2025-6>
14. Підшипники ковзання. Навчальний наочний посібник [Електронний ресурс]: для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальностями 131 «Прикладна механіка», 133 «Галузеве машинобудування» уклад.: А. К. Скуратовський .–Електронні текстові данні 1файл:10,7 МБ – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 38 с.
15. Підшипники ковзання. Навчальний наочний посібник [Електронний ресурс]: для здобувачів ступеня бакалавра за спеціальностями 131 «Прикладна – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 38 с.
16. Системи підтримки прийняття рішень : навчальний посіб- ник для самостійного вивчення дисципліни / уклад.: С. М. Братушка, С. М. Новак,

- С. О. Хайлук. Суми : ДВНЗ «УАБС НБУ», 2010. 265 с.
17. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту і підтримки прийняття рішень: Навчальний посібник. Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. 341 с.
 18. Інформаційні системи моніторингу технічного стану автомобілів / В. П. Волков та ін. Харків: ХНАДУ, 2018. 300 с.
 19. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів. Харків: «Майдан», 2018. 261 с/
 20. Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. – Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 – 320 с. <http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>
 21. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>
 22. Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
 23. Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Конструкторсько-технологічна практика. Методичні вказівки для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 22 с.
 24. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>
 25. Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних

- систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
26. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>
27. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с.
28. Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>
29. Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур , Г.В. Козбур , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>
30. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>

31. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>
32. Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>
33. Лабораторний практикум з проектування та моделювання роботи електропневматичних схем у середовищі програмного пакету «FluidSIM Pneumatics» з курсу «Технічні засоби автоматизації» / укл. : О.К. Шкодзінський. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 32 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31418>
34. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>
35. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. -26 с.
36. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
37. Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи. : Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Теорія автоматичного управління», для здобувачів спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньо-професійних програм «Комп’ютерно-інтегровані системи автоматики та робототехніки», «Комп’ютеризовані системи управління та прикладне програмування». / укл. І.Р. Козбур, В.П. Пісьціо, В.Б. Савків,

- П.С. Федорів. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. – 67 с
38. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
39. Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня бакалавр усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>
40. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
41. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
42. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп’ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
43. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
44. Буров Є., Митник М. Комп’ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.
45. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитиший, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця

- В.А., 2023. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42625>
46. Конспект лекцій з дисципліни «Комп’ютерні системи штучного інтелекту» для студентів спеціальності G7 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форми здобуття освіти / уклад. І. С. Дідич. // ТНТУ. – 2025. – С. 92. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50293>
47. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>
48. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп’ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
49. I. Strutynska, H. Kozbur, L. Dmytrotsa, O. Sorokivska, L. Melnyk and R. Grytseliak, "Regarding to the Concept of Small and Medium-Sized Enterprises Digitalization in Ukraine: Problems and Solutions," 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 2021, pp. 276-279, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.9548382.
50. Валяшек В.Б. Навчальний посібник з курсу: “ Оптимізаційні методи та моделі “ для спеціальностей “Облік і аудит, Фінанси і кредит, Маркетинг, Економічна кібернетика” / Кривень В.А., Валяшек В.Б., Цимбалюк Л.І., Козбур Г.В. – Тернопіль : видавництво ТНТУ, 2015. – 83 с.
51. Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>