

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства


ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ БАКАЛАВРА

на тему Визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально
змодельованої поверхні конструкційного матеріалу

Шифр: ДРМТВАТАМ 24.20213.000. ПЗ

Галузь знань 13 – Механічна інженерія
Шифр і назва галузі знань
Спеціальність 132 – Матеріалознавство
Шифр і назва спеціальності
Рівень вищої освіти Перший бакалаврський
Рівень вищої освіти
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів
Назва освітньої програми

Виконав: студент 4 курсу, група МТВА-20-1  Владислав ЛЕВЧУК
Курс, група виконавця Підпис Ім'я, прізвище

Керівник: д.т.н., доцент кафедри ТАМ  Ілона ДРАЧ
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, прізвище

До захисту допускаю:

зав. кафедри ТАМ, д.т.н., професор  Олександр ДИХА
Підпис Ім'я, прізвище

4 06 2024 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства
Рівень вищої освіти перший бакалаврський
Галузь знань 13 – Механічна інженерія
Спеціальність 132 – Матеріалознавство
Освітньо-професійна програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ

(підпис)
д.т.н., професор Олександр ДИХА
Науковий ступінь, ім'я, прізвище
« 20.02 » 2024 року

ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Завдання видано студенту Левчуку Владиславу Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дипломної роботи бакалавра: «Визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу»

Керівник роботи доцент кафедри ТАМ Драч Ілона Володимирівна
(посада, прізвище, ім'я, по батькові)

2. Затверджено наказом університету від 15 лютого 2024 р. № 8

3. Дата видачі завдання студенту: 20 лютого 2024 р.

4. Строк подання студентом роботи на кафедру: 10 червня 2024 р.

5. Вихідні дані: джерела інформації щодо теми ДРБ.

6. Зміст пояснювальної записки (перелік задач): провести аналіз предметної області, подати огляд математичних підходів до опису рельєфу інженерних поверхонь, зокрема: статистичне, стохастичне і топологічне моделювання, їх обмеження, переваги і недоліки; визначити впровадження принципів теорії фрактальних структур, що дасть можливість увести в аналіз структуроутворення в поверхневих і приповерхневих шарах матеріалів ступінь нерівноважності трибологічної системи; на основі результатів аналізу реалізувати спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу.

7. Перелік графічного матеріалу: *графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах.*

8. Консультанти розділів роботи:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

9. Календарний план виконання дипломної роботи бакалавра:

№	Назва етапів (розділів) дипломної роботи бакалавра	Термін виконання	Примітка
1	<i>Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики дипломної роботи бакалавра з керівником</i>	<i>01.02.2024</i>	<i>виконано</i>
2	<i>Ознайомлення з предметною областю, формулювання мети та задач дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження</i>	<i>30.02.2024</i>	<i>виконано</i>
3	<i>Робота над розділом 1 – Характеристика предметної області та постановка задачі</i>	<i>30.02.2024</i>	<i>виконано</i>
4	<i>Робота над розділом 2 – Сучасне математичне моделювання при вивченні механізму контакту і руйнування інженерних поверхонь тертя</i>	<i>30.03.2024</i>	<i>виконано</i>
5	<i>Робота над розділом 3 – Спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання</i>	<i>30.04.2024</i>	<i>виконано</i>
6	<i>Оформлення пояснювальної записки згідно вимог</i>	<i>30.05.2024</i>	<i>виконано</i>

Виконавець: студент 4 курсу, група МТВА-20-1  Владислав ЛЕВЧУ
Курс, група виконавця Підпис Ім'я, прізвище

Керівник: д.т.н., доцент кафедри ТАМ  Ілона ДРАЧ
Науковий ступінь, посада Підпис Ім'я, прізвище

РЕФЕРАТ

Тема дипломної роботи бакалавра: Визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу

Виконавець дипломної роботи бакалавра: студент групи МТВА-20-1
Левчук Владислав Михайлович

Керівник дипломної роботи бакалавра: д.т.н., доцент кафедри ТАМ
Драч Ілона Володимирівна

Дипломна робота бакалавра містить:

Пояснювальна записка				Кількість додатків
Сторінок	Рисунків	Таблиць	Джерел інформації	
55	12	2	30	1

Метою дипломної роботи є розробка способу визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання.







Для досягнення поставленої мети визначені такі завдання дослідження: подати огляд розвитку досліджень існуючих методів моделювання у галузі трибології; проаналізувати класифікацію методів фрактального аналізу структури інженерних поверхонь контакту; розглянути хід дослідження й етапи фрактального моделювання; розробити спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання; реалізувати спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу.

Результатом виконання дипломної роботи бакалавра є спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу.

Ключові слова: ШОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ, ФРАКТАЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВЕРХНІ, КОНТАКТНА ЖОРСТКІСТЬ ПОВЕРХНІ.

ЗМІСТ

Перелік скорочень	6
Вступ.....	7
1 Характеристика предметної області та постановка задачі.....	9
1.1 Аналіз предметної області	9
1.1.1 Шорсткість поверхні	9
1.1.2 Нормальна контактна жорсткість поверхні	16
1.2 Мета і задачі дослідження	19
2 Сучасне математичне моделювання при вивченні механізму контакту і руйнування інженерних поверхонь тертя	21
2.1 Ймовірісно-статистичні характеристики шорсткості поверхні	21
2.2 Методи топологічного моделювання інженерної поверхні.....	24
2.3 Фрактальні підходи до топографії поверхні	25
2.4 Застосування функції спектральної щільності потужності до шорстких поверхонь	33
2.5 Висновки до розділу 2	34
3 Спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання	35
3.1 Фрактальна розмірність	35
3.2 Фрактальні моделі поверхні	35

ДРМТВАТАМ 24.20213.000 ПЗ				
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
				
Розроб.		Левчук		
Перевір.		Драч		
Реценз.		Костюк		
Н. Контр.		Бабак		
Затверд.		Диха		
Визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу			Лім.	Арк.
			4	55
ХНУ група МТВА 20-1				

3.3	Моделювання фрактальних поверхонь	36
3.4	Моделювання виступу	40
3.5	Спосіб оцінки нормальної контактної жорсткості	43
3.5.1	Взаємодія окремої сферичної нерівності із твердим штампом	43
3.5.2	Основні співвідношення між навантаженням і деформацією	45
3.5.3	Множинний контакт	46
3.5.4	Пружна контактна взаємодія фрактальних поверхонь	47
3.5.5	Контактна жорсткість фрактальних поверхонь	48
3.6	Висновки до розділу 3	50
	Висновки	51
	Перелік посилань	52
	Додаток	55

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

Перелік скорочень

Скорочення, термін, позначення	Пояснення
ПШ	Поверхневий шар
ЯПШ	Якість поверхневого шару
ВПД	Пружна система верстат-пристосування-інструмент-деталь
S	Крок
R	Висота нерівностей поверхні
K_N	Контактна жорсткість фрактальної поверхні
$N(x)$	Кореляційна функція для гаусівського випадкового процесу
W-M	Функція Вейерштрасса-Мандельброта
D	Фрактальна розмірність
ДРБ	Дипломна робота бакалавра

Вступ

Дипломна робота бакалавра присвячена розробці способу визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання.

Актуальність.

Сучасна трибологія дає можливість правильно розраховувати, діагностувати, прогнозувати й підбирати відповідні матеріали пар тертя, призначати оптимальний режим роботи трибоз'єднання. Основним параметром для вирішення проблем тертя та інших проблем трибології є топографія поверхні. Основне призначення моделей в цих задачах – відображення трибологічних властивостей інженерних поверхонь. В рамках класичного підходу топографія поверхні досліджується на основі її зображень з точки зору функціональних і статистичних характеристик: оцінки функціональних характеристик мають за основу максимальну шорсткість за висотою і середню шорсткість по центральній лінії, а статистичні характеристики оцінюються за допомогою спектра потужності або функції автокореляції. Однак, ці характеристики не є лише властивостями поверхні. Вони залежать від роздільної здатності приладу для вимірювання геометрії поверхні та довжини сканування. Зокрема, ступінь складності форми поверхні можна подати через параметр, який називається фрактальною розмірністю: вищий ступінь складності має більше значення цього параметра. Фрактальна розмірність є характеристикою рельєфу поверхні та дає можливість пояснити трибологічні явища без впливу роздільної здатності.

У цій роботі подано огляд математичних підходів до опису рельєфу інженерних поверхонь, зокрема статистичне, стохастичне і топологічне моделювання, їх обмеження, переваги і недоліки. Обговорюється впровадження принципів теорії фрактальних структур, що дає можливість увести в аналіз структуроутворення в поверхневих і приповерхневих шарах матеріалів ступінь

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

нерівноважності трибологічної системи й описати розвиток процесів тертя й зношування. Саме це є основою керування структурою поверхневих шарів матеріалів із заданими властивостями. Концепція фракталів, використовувана для кількісного опису дисипативної структури зони трибоз'єднання, дозволяє встановити зв'язок її фрактальної розмірності з механічними властивостями, а також критичними станами деформації металів і сплавів.

Отримані знання стануть підґрунтям для подальшого удосконалення методів аналізу структури інженерних поверхонь контакту.

Мета і завдання кваліфікаційної роботи.

Метою дипломної роботи є розробка способу визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання дослідження:

- подати огляд розвитку досліджень існуючих методів моделювання у галузі трибології;
- проаналізувати класифікацію методів фрактального аналізу структури інженерних поверхонь контакту;
- розглянути хід дослідження й етапи фрактального моделювання;
- розробити спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання;
- реалізувати спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу.

Об'єкт дослідження – жорсткісні властивості поверхні конструкційного матеріалу.

Предмет дослідження – фрактальне моделювання поверхні конструкційного матеріалу.

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 Характеристика предметної області та постановка задачі

1.1 Аналіз предметної області

Будова та властивості поверхонь деталей, що утворюються при обробці, мають значний вплив на надійність та довговічність машин та інших виробів [1]. Зміни у будові та властивості поверхні можуть бути пов'язані з механічними, металургійними, хімічними та іншими факторами. Ці зміни, хоч і обмежені тонкими поверхневими шарами, визначають якість виробів або можуть, у деяких випадках, зробити поверхню недостатньо функціональною. Розуміння основних змін у стані та властивостях поверхні необхідні для забезпечення необхідної якості виробів. Параметри якості поверхневого шару (ЯПШ) визначають умови експлуатації, де можуть використовуватися деталі. Способи фінішної обробки поверхні, фізико-хімічні властивості поверхневого шару (ПС), вплив комплексу параметрів шорсткості поверхні, залишкові напруги, деформаційне зміцнення, структурно-фазові перетворення та ін. корозія під напругою [2].

1.1.1 Шорсткість поверхні

Шорсткість поверхні є однією із основних геометричних характеристик якості поверхні деталей, яка, у свою чергу, впливає на її експлуатаційні показники в цілому [3].

Якість поверхні є одним із найважливіших чинників, який забезпечує високі експлуатаційні властивості деталей машин і приладів та залежить, у свою чергу, від властивостей матеріалу (фізичні, механічні, електрофізичні, електрохімічні, тощо) і методу обробки (різання лезовим інструментом, шліфування, полірування, тощо) [3].

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У процесі механічної обробки поверхневий шар деформується під дією навантажень і температури, а також піддається забрудненню домішками (абразив, кисень, мастильно-охолоджуюча рідина) або іншими сторонніми включеннями.

Геометричні характеристики якості поверхні (рис. 1.1 [3]) за порядком зменшення їх абсолютних величин прийнято поділяти на:

- відхилення форми (макрогеометрія);
- хвилястість;
- шорсткість (мікрогеометрія);
- субмікрошорсткість.

В окремих випадках хвилястість буває більшою за похибку форми, а шорсткість більшою за хвилястість. На практиці, хвилястість займає проміжне положення між шорсткістю та похибками форми поверхні. Зазначимо, що критерієм для їх розмежування прийнято вважати співвідношення кроку S до висоти нерівностей R .

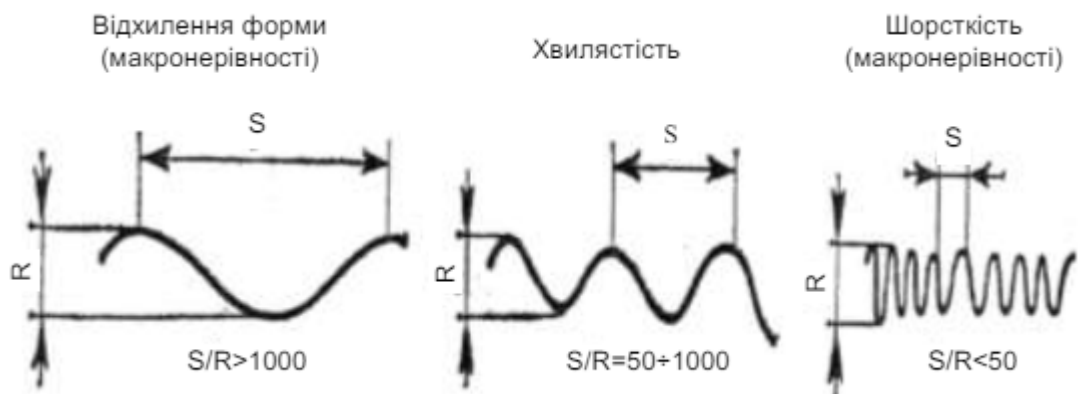


Рисунок 1.1 – Класифікація геометричних характеристик якості поверхні [3]

Шорсткість і хвилястість поверхні взаємопов'язані між собою. Хвилястість є елементарним відхиленням поверхні будь-якої форми. Висота нерівностей хвилястості та висота шорсткості приблизно однакові, але співвідношення кроку до висоти різне.

Хвилястість – це сукупність періодично-повторюваних нерівностей на поверхні, які утворюються насамперед у зв'язку з коливаннями або відносними коливальними рухами в системі ВПД. Хвилястість визначається за нормальним перетином поверхні, причому шорсткість та інші відхилення форми виключають. До хвилястості, як правило, відносять періодичні нерівності, у яких відношення кроку до висоти більше 40. У виробках з круглим перетином до хвилястості слід віднести відхилення за радіальним перетином, у яких крок є меншим за $1/15$ кола [3].

Зауважимо, що міцність деталей також залежить від шорсткості поверхні. Руйнування деталі, особливо за умов змінних навантажень, у більшій мірі пояснюється концентрацією її напружень, внаслідок наявних нерівностей. Чим меншою є шорсткість, тим меншою є можливість виникнення поверхневих тріщин внаслідок втоми матеріалу. Фінішна обробка деталей (доведення, полірування, тощо) забезпечує значне підвищення межі їх втомної міцності. Зменшення шорсткості поверхні у значній мірі покращує антикорозійну стійкість деталей (за умови, коли неможливо застосовувати захисні покриття) [1].

Належна якість поверхні відіграє важливу роль і у з'єднаннях, які відповідають умовам щільності, герметичності, теплопровідності.

Важливою геометричною характеристикою якості поверхні є напрям штрихів (слідів) механічної та інших видів обробки. Вона впливає на зносостійкість поверхні, визначення посадок, міцність пресових з'єднань. У відповідальних випадках конструктору необхідно обумовлювати спрямування слідів обробки на поверхні деталі [3].

Високій точності завжди відповідають як малі шорсткості, так і хвилястість поверхонь. Це визначається не тільки умовами роботи спряжених деталей, але й необхідністю отримання надійних результатів вимірювань на виробництві. Зменшення шорсткості поверхні вносить певну визначеність у характер з'єднання, оскільки розмір зазору (натягу), який отримано в результаті

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						11
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

контролю деталей, відрізняється від розміру ефективного зазору або натягу, що має місце під час експлуатації або складанні. Ефективний натяг за умов складання зменшується, а зазор під час роботи механізму збільшується, причому тим більше та швидше, чим більш грубо оброблено поверхні, які з'єднуються. Зауважимо, що мала шорсткість поверхні використовується для надання зовнішньому вигляду деталі естетичного вигляду або зручності утримання поверхонь в чистоті [3].

Вимоги які висуваються до шорсткості поверхні необхідно встановлювати виходячи із функціонального призначення поверхні для забезпечення заданої якості виробів. Якщо в цьому немає необхідності, то вимоги щодо шорсткості поверхні не встановлюють і шорсткість такої поверхні не піддається контролю.

Вимоги які висуваються до шорсткості поверхні не включають у себе вимог щодо дефектів поверхні (тріщини, раковини), тому під час контролю шорсткості поверхні вплив дефектів поверхні необхідно виключити. Зазначимо, що, у деяких випадках, нормативними документами допускається встановлення вимог відносно шорсткості окремих ділянок однієї поверхні, які номінально є різними.

Нормативним документом (ДСТ 2789-73 [4]) встановлено вимоги, які висуваються до шорсткості поверхні, незалежно від способу її отримання або обробки. Це дає можливість застосовувати ці вимоги до поверхонь, які оброблені різанням та іншими методами (наприклад: лиття, пресування, електрофізичні та електрохімічні методи, тощо).

Параметри для нормування шорсткості поверхні. Шорсткість поверхні оцінюють за нерівностями профілю (найчастіше поперечного), який отримано шляхом перетину реальної поверхні площиною (найчастіше у нормальному перетині). Для відділення шорсткості поверхні від інших нерівностей з відносно великими кроками (відхилення форми і хвилястості) її слід розглядати у межах обмеженої ділянки (рис. 1.2), довжину якої називають базовою довжиною l (базою для відліку відхилень профілю є середня лінія профілю m) [3].

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						12
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Під час нормування шорсткості поверхні конструктором застосовується три основні способи регламентації якості поверхні (у тому числі і шорсткості): за прототипом (метод прецедентів); розрахунковий; експериментальний.

Вибір параметрів та їх значень, які є необхідними, для нормування шорсткості необхідно проводити із урахуванням службового призначення поверхні та встановлення їх зв'язку з її експлуатаційними властивостями. В таблиці 1.1 наведено деякі (найважливіші) експлуатаційні властивості поверхні, які залежать від її шорсткості, а також номенклатура параметрів, за допомогою яких забезпечують показники цих властивостей [3].

Таблиця 1.1 – Експлуатаційні властивості поверхні та їх характеристики [3]

Експлуатаційні властивості поверхні	Параметри шорсткості та характеристики, які визначають експлуатаційні властивості
Зносостійкість для усіх видів тертя	Ra (Rz), t_p , напрям нерівностей
Вібростійкість	Ra (Rz), S_m , S, напрям нерівностей
Контактна жорсткість	Ra (Rz), t_p
Міцність з'єднання	Ra (Rz)
Міцність конструкцій за циклічних навантажень	R_{max} , S_m , S, напрям нерівностей
Герметичність з'єднань	Ra (Rz), R_{max} , S, t_p , напрям нерівностей
Опір у хвилеводах	Ra, S_m , S

Основним у всіх випадках є нормування висотних параметрів. Переважно, у тому числі й для самих грубих поверхонь, нормується параметр R_a , який є більш інформативним, у порівнянні з R_z і R_{max} , для характеристики нерівності профілю, оскільки визначається за усіма точками (або за достатньо-великою кількістю точок) профілю.

Параметри R_z і R_{max} нормують у тих випадках, коли за функціональними вимогами необхідно обмежити повну висоту нерівностей профілю, а також коли неможливо здійснити прямий контроль параметра R_a за допомогою профілометра або порівняльних зразків (наприклад, для поверхонь, які мають

малі розміри або складну конфігурацію (ріжучі крайки інструментів, деталі годинникових механізмів, тощо)) [3].

Для відповідальних поверхонь проводять нормування не тільки висотних параметрів, але й крокових і параметра t_p , оскільки вони забезпечують деякі їх функціональні властивості.

Вимоги які висуваються до шорсткості поверхні необхідно встановлювати шляхом зазначення [3]:

- параметра шорсткості (одного або декількох);
- числових значень вибраних (встановлених) параметрів;
- базової довжини, на якій відбувається визначення зазначених параметрів.

На практиці прийнято застосовувати три варіанти вказування числових значень параметра (параметрів) шорсткості [3]:

- найбільшим значенням;
- діапазоном значень;
- номінальним значенням.

Найбільш поширеним, який стосується деталей машин та приладів, є варіант, коли вказують числове значення параметра, яке відповідає найбільш грубій допустимій шорсткості, тобто найбільшому граничному значенню для параметрів R_a , R_z , R_{max} , S_m , S і найменшому граничному значенню параметра t_p . В окремих випадках, коли для правильного функціонування недопустимою є занадто гладка поверхня, застосовують другий варіант, за якого зазначають діапазон значень параметра (найбільше та найменше граничне значення). Третій варіант застосовують порівняно рідко, в основному для порівняльних зразків шорсткості поверхні або для зразкових деталей, які застосовують із тією ж метою. У цьому випадку вказують номінальне значення параметра із допустимим граничним відхиленням від нього (%) [3].

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Зауважимо, що встановлення вимог, які висуваються до шорсткості, шляхом зазначенням номінальних значень параметра забезпечує найбільш строгий метрологічний контроль

Взаємозв'язок між параметрами якості поверхні деталей та їх експлуатаційними властивостями є одним із основних напрямків досліджень у галузі механічна інженерія [1].

1.1.2 Нормальна контактна жорсткість поверхні

Жорсткість – це здатність тіл протидіяти зовнішнім силам, якомога менше деформуючись [5].

Розрізняють власну жорсткість деталей, обумовлену деформаціями всього матеріалу деталей, що розглядаються як балки, пластини, оболонки з ідеалізованими опорами, і контактну жорсткість, яка пов'язана з деформаціями поверхневих шарів матеріалу в зоні контактної взаємодії деталей.

Переважно за умови значних навантажень основну роль відіграє власна жорсткість, однак, у прецизійних машинах чи приладах при відносно малих навантаженнях контактні деформації відіграють значну роль і можуть навіть перевищувати власні. Контактна жорсткість може визначати точність руху деталей, що контактують, викликати додаткові динамічні навантаження, впливати на зносостійкість поверхонь та їх довговічність, на розсіювання енергії коливань [6].

Якщо площа контакту мала, контактні деформації суттєві, і їх розрахунок виконують за формулами Герца [6].

При великій контактній площі деформації, зумовлені зминанням мікронерівностей, визначають за емпіричними формулами з використанням експериментально встановлених коефіцієнтів контактної податливості.

Найважливішими конструктивними заходами з підвищення контактної жорсткості є [6]:

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

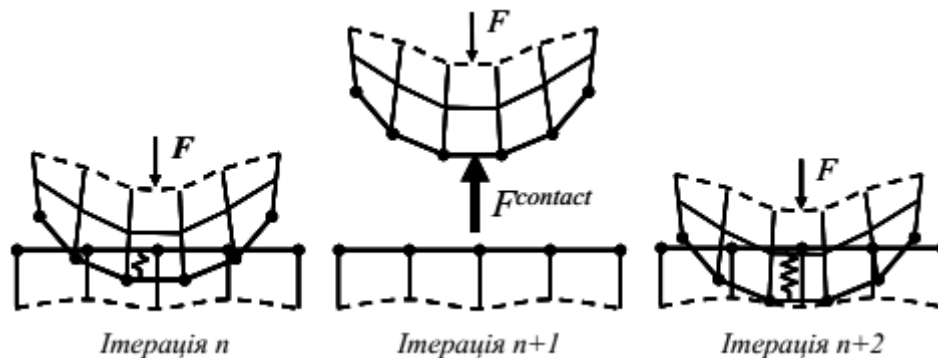


Рисунок 1.3 – Осциляції при розв’язанні контактної задачі [7]

Крім нормальних сил (тиску), контактні скінченні елементи також передають і дотичні сили (тертя).

Контактні скінченні елементи використовують дотичну контактну жорсткість для сумісності в тангенціальному напрямку. Дотична контактна жорсткість впливає на контакт і точність аналогічно так, як і нормальна контактна жорсткість (рис. 1.4 [7]).

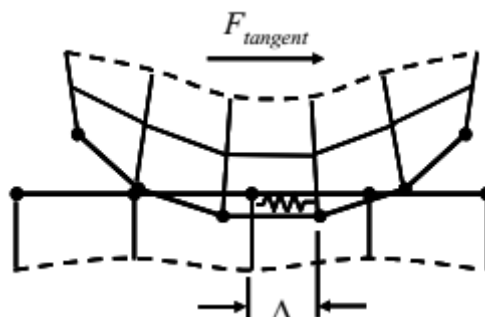


Рисунок 1.4 – Дотична контактна жорсткість стику [7]

Контактна жорсткість – важливий параметр, який впливає і на точність, і на контакт. Необхідно акуратно підбирати значення контактної жорсткості і додержуватися балансу між хорошим контактом і точністю. Найкраще значення контактної жорсткості залежить від конкретної задачі і часто визначається “методом проб і помилок” або математичним моделюванням

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

1.2 Мета і задачі дослідження

Поверхні деталей мають деяку шорсткість, тобто сукупність виступів і впадин, що мають в основному випадкову форму і розподіл. Ступінь шорсткості визначається видом і умовами обробки і складання. В стиках шорстких поверхонь контактування носить дискретний характер і контактні деформації деталей визначаються деформуванням мікро- і макровиступів поверхонь.

Підвищення надійності багатьох технічних систем є неможливим без поглибленого вивчення процесів, що відбуваються на поверхнях тертя; розвитку фізичних уявлень про тертя й зношування; застосування сучасних методів досліджень, заснованих на результатах і методах, використовуваних у класичних фундаментальних і прикладних фізико-математичних науках; використання комп'ютерних технологій.

Сучасне математичне моделювання при вивченні механізму контакту і руйнування інженерних поверхонь тертя розвивається за такими основними напрямками: статистичне моделювання, стохастичне моделювання, топологічне моделювання, фрактальне моделювання.

Дипломна робота бакалавра стосується в основному інженерних поверхонь, тобто таких, що використовуються в інженерній практиці. Відомо, що всі технічні поверхні є шорсткими [1, 2, 3], тому контакт між технічними поверхнями здійснюється за допомогою кількох контактних точок [8].

Якщо профіль поверхні $z(x)$ визначають за допомогою розкладу Фур'є, а термін «шорсткість» означено як короткохвильова форма, тоді технічну поверхню означають як довгохвильову форму і називають «хвилеподібною» поверхнею [9].

Якщо хвилеподібність вилучити з профілю поверхні, шорстку поверхню можна вважати номінально плоскою [10].

Шорсткість технічних поверхонь є вирішальним чинником для продуктивності трибологічних компонентів. На розсіювання енергії під час

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

ковзання сухих інженерних поверхонь і, відповідно, на тертя величезний вплив має профіль поверхні [11].

Метою дипломної роботи є розробка способу визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання дослідження:

- подати огляд розвитку досліджень існуючих методів моделювання у галузі трибології;
- проаналізувати класифікацію методів фрактального аналізу структури інженерних поверхонь контакту;
- розглянути хід дослідження й етапи фрактального моделювання;
- розробити спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання;
- реалізувати спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу.

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 Сучасне математичне моделювання при вивченні механізму контакту і руйнування інженерних поверхонь тертя

2.1 Ймовірно-статистичні характеристики шорсткості поверхні

Сучасне дослідження передбачає системний підхід до вивчення триботехнічних задач. Значення такого підходу зростає у випадку застосування ймовірно-статистичних методів при розв'язанні задач в галузі тертя, оскільки цей процес є досить складним і має стохастичний характер функціонування. Метод створення математичних моделей процесу тертя і зношування з використанням апарату теорії подібності, розмірностей і математичного планування експерименту є досить прогресивним, оскільки перехід до узагальнених координат різко зменшує кількість чинників, які необхідно враховувати, і дає достатньо обґрунтовані значення початкових параметрів. Більшість трибологічних систем працює у відповідності до принципу Парето, який стверджує, що з точки зору характеристик системи суттєвими є лише деякі з множини чинників. Для визначення суттєвих чинників використовують методи групового врахування аргументів, апріорного ранжування чинників, рангової кореляції, випадкового балансу та інші. Раціональний вибір відповідного метода визначається наявністю апріорної інформації про досліджуваний об'єкт. Для встановлення зв'язку між вхідними і вихідними параметрами і одержання математичної моделі, адекватної досліджуваному об'єкту, широко використовується регресійний аналіз.

Одна з перших спроб застосувати статистичні методи для опису шорсткості поверхні була представлена Ебботтом і Фаєрстоуном, які розраховували кумулятивну функцію розподілу висот поверхні:

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Phi(z) = \int_z^{\infty} \phi(t) dt,$$

де $\phi(z)$ – функція щільності ймовірності.

У трибології цей параметр називається кривою Еббота-Фаєрстоуна або кривою опорної площі. В подальшому було введено величезну кількість статистичних параметрів шорсткості [12]. Ці характеристики були пов'язані як з вертикальним розподілом висот, так і з горизонтальним розподілом грубих профілів [13].

Наступним кроком у дослідженнях шорсткості поверхні була ідея моделювання на основі теорії випадкових процесів. Вперше ця ідея реалізована Ліннік і Хусом [14], які запропонували використовувати для опису шорсткості поверхні деталі графіки стаціонарного гаусівського випадкового процесу та кореляційну функцію для гаусівського випадкового процесу $N(x)$:

$$N(x) = N(0) \cdot e^{(-\alpha|x|)}, \quad (1)$$

де $N(0)$ і α – деякі параметри шорсткості. Аналогічна ідея подана пізніше Уайтхаусом і Арчардом [15]. Вони запропонували описувати гаусівський профіль $z(x)$ випадкової шорсткої поверхні розподілом висот її виступів і кореляційною (автокореляційною) функцією процесу $R(\delta)$:

$$R(\delta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T [z(x+\delta) - \bar{z}][z(x) - \bar{z}] dx, \quad (2)$$

де \bar{z} - середня лінія профілю.

Результати статистичного моделювання є ефективними, якщо шорсткість є гаусовою (нормальною). Якщо шорсткість не є нормальною, тоді властивості

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

контакту впливають довжина вибірки та роздільна здатність вимірювального приладу [16].

Статистичні моделі контакту з декількома виступами між двома номінально плоскими поверхнями є найпопулярнішими для прогнозування контактної поведінки шорстких поверхонь, їх припущення та спрощення значно обмежують їх достовірність, а критерії ідентифікації виступів та їх характеристик призводять до значних відхилень у розрахованих топографічних вхідних параметрах, які також сильно залежать від роздільної здатності техніки вимірювання топографії. Типові інженерні поверхні також не є ізотропними, а розподіл висот виступів не є гаусівський [17].

2.2 Методи топологічного моделювання інженерної поверхні

Традиційні методи топологічного моделювання (геометричної оцінки) формування різних об'єктів, у тому числі й у трибології, засновані на наближеній апроксимації структури досліджуваного об'єкта (у трибології поверхневих і приповерхневих шарів) геометричними фігурами, до прикладу, лініями, відрізками, площинами, багатокутниками, багатогранниками, сферами. Ці прийоми ґрунтуються на класичній евклідовій геометрії, топологічна розмірність якої є цілим числом. При цьому внутрішня структура досліджуваного об'єкта, як правило ігнорується, а процеси утворення структур і їх взаємодії між собою та з навколишнім середовищем характеризуються інтегральними термодинамічними параметрами. Це, природно, приводить до втрати значної частини інформації про властивості й поведінку досліджуваних систем, які, по суті, замінюються більш-менш адекватними моделями. У деяких випадках така заміна цілком виправдана. Однак, існують задачі, коли використання топологічно нееквівалентних моделей є принципово неприпустимим. Зокрема, для моделювання структурноскладних об'єктів, де

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

необхідна узагальнена концепція конкретного фізичного уявлення про структуру і опис у зв'язку з цим властивостей об'єкту.

Прикладом топологічного моделювання пружного контакту двох номінально плоских металевих поверхонь є модель Грінвуда - Вільямсона [10]. Модель рельєфу поверхні є набором сферичних сегментів, що мають однаковий радіус закруглення верхньої частини виступів і розташованих на середній площині шорсткої поверхні. Модель заснована на досить чітких фізичних положеннях про контактну взаємодію шорстких поверхонь при пружному стані фрикційних плям контакту (кількість контактуючих сфер певної висоти збільшується, коли поверхні наближаються одна до одної) [10]. Прийняття сталого радіуса верхньої частини виступів спрощує моделювання процесу контактної взаємодії, при цьому точність розрахунків знижується. А при малих навантаженнях, коли при визначенні параметрів контакту маємо врахувати субшорсткість (коли контакт між двома шорсткими поверхнями складається з великої кількості контактних плям різного розміру), модель Грінвуда - Вільямсона є незастосовною. Усунути недоліки, властиві моделі Грінвуда - Вільямсона, вдалось А. Маджумдару (Majumdar) [18] із застосуванням фрактального моделювання.

2.3 Фрактальні підходи до топографії поверхні

Фактично фрактальну термінологію для опису шорсткості поверхні започаткували Беррі та Ханне [19], які стверджували, що геометричні властивості шорстких поверхонь можна охарактеризувати новою концепцією «фрактала», яка детально описана Мандельбротом [20]. Він увів поняття фракталу, фрактальної геометрії та фрактальної розмірності (FD).

Фрактальна геометрія набула поширення в трибології завдяки роботам В.С. Іванової [21], А.Х. Джанахмедова [22], які присвячені аналізу й керуванню структуроутворенням у сплавах, поверхневих і приповерхневих шарах

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів як у відкритих нелінійних системах, які є далекими від стану термодинамічної рівноваги. Такі системи є нерівноважними завдяки розсіянню енергії, одержуваної ззовні. Внаслідок самоорганізації у таких системах можуть виникати стійкі структури, які існують за умови сталої дисипації, тобто втрати системою енергії. З появою складної впорядкованої структури в системі зростає ентропія, яка компенсується негативним потоком ентропії зовні.

На сьогодні встановлено, що опір руйнуванню металів і сплавів визначається динамічною структурою, яка формується в процесі деформації і має властивості дисипативності. В трибології поверхневі шари й усі внутрішні розмежування слід розглядати як самостійну планарну нелінійну підсистему з порушеною трансляційною інваріантністю, яка є провідною функціональною підсистемою в деформованому твердому тілі. Основна частина виникаючих при терті напружень зосереджена в приповерхневих шарах фрикційних елементів. Перебудова поверхневого шару під дією зовнішніх теплових навантажень відбувається саме в процесі встановлення температурного поля і є процесом дисипативного структуроутворення, пов'язаного із деформаційними дефектами [21].

Самоорганізовані дисипативні структури у відкритих системах є фрактальними [22]. Це дозволяє застосовувати фрактальне моделювання при вивченні фізико-механічної природи руйнування матеріалів уведенням нових кількісних показників структур у вигляді фрактальної розмірності.

Основою фрактального моделювання є поняття фрактала – самоподібної структури з дробовою розмірністю, яка має властивість масштабної інваріантності. Загалом, фрактали є потужним інструментом для розуміння та проектування матеріалів зі складною структурою та властивостями [22]. В основу покладені роботи Дж. Раса (Russ J.C.) [22], Б. Мандельброта (Mandelbrot), Е. Федера (Feder) [23] та ін.

Фрактальна розмірність FD характеризує будь-яку самоподібну систему: при зміні лінійних розмірів в u разів, фрактальна величина змінюється в u^{FD}

					ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

разів. Фрактальна розмірність пов'язана не з топологією, а з способом побудови розглядуваного об'єкта [23].

Для фрактальної структури розмірність або, зазвичай, дробовий параметр FD , описує збереженість статистичних характеристик при зміні масштабу. Фрактальна розмірність дозволяє кількісно описувати мікроструктури і складові їх елементи, встановлювати дійсну площу зіткнення фаз, дійсні довжини «шорстких» ліній і поверхонь і визначати інші структурні параметри, пов'язані із властивостями матеріалів. Дробова метрична розмірність таких об'єктів не тільки характеризує їх геометричний образ, але й відбиває процеси їх утворення й еволюції, а також визначає динамічні властивості. Фрактали дають компактний спосіб опису об'єктів і процесів у строгих кількісних термінах.

Фрактальна модель припускає, що інженерна поверхня є самоподібною (частина поверхні відбиває весь об'єкт) і скейлінговою (частина повторює свої структурні особливості при різному масштабі виміру). Таким чином, фрактальний підхід має потенціал для прогнозування поведінки поверхневого явища на певному масштабі довжини на основі спостережень на інших масштабах довжини.

Самоподібність структур встановлюють на основі аналізу певних геометричних картин та їх вимірів при різних масштабах збільшення. Для того щоб встановити фрактальність структури, необхідно [21]: 1) перевірити самоподібність; 2) визначити межі самоподібності; 3) розрахувати фрактальну розмірність.

Методологія фрактального трибомодельювання пояснюється на рисунку 2.1, де визначені основні етапи дослідження та їх результати [24].

Слід зазначити, що визначення зв'язку між властивістю й фрактальною структурою – є складною задачею, оскільки існуючі моделі, що встановлюють ці зв'язки для періодичних структур, не застосовні до фрактальних [24]. Розв'язання вказаної задачі потребує розробки фрактального аналізу мікроструктур, визначення області існування структурної самоподібності, а

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

незалежно від одиниці вимірювання. Значення цих параметрів зростають при зменшенні масштабу вимірювання.

експериментальні методи визначення фрактальної розмірності

пористих поверхонь

- метод порометрії;
- за даними вторинної електронної емісії;
- метод малокутового розсіювання

шорстких поверхонь

- за фізичними властивостями об'єкта;
- адсорбційні методи

поверхонь руйнування

- за механічними властивостями об'єкта
- фрактографічні (металографічні) методи:
 - метод островів зрізу
 - фур'є-аналіз профілів
 - метод вертикальних перерізів
 - метод перетворення подібності

Рисунок 2.2 – Класифікація експериментальних методів визначення фрактальної розмірності статистично-подібних структур [24]

Фрактальну геометрію можна використовувати як адаптований простір для грубої морфології, у якій шорсткість можна розглядати як неперервну, але недиференційовану функцію, а розмір FD цього простору є внутрішнім параметром для характеристики топографії поверхні [18]. Фрактальну розмірність використовують як індикатор реальних значень різних залежних від масштабу параметрів, таких як довжина, поверхні та об'єм шорсткості і як інваріантний параметр для аналізу закону розподілу площі контактних точок.

Реальні фізичні об'єкти, які мають ознаки самоподібності, вкрай рідко можуть бути описані за допомогою лише однієї величини фрактальної розмірності. Саме тому останнім часом одержав великого поширення аналіз, заснований на теорії мультифракталів – неоднорідних фрактальних об'єктів. Характеристикою мультифрактала є нескінченний спектр таких розмірностей, який називають узагальненою фрактальною розмірністю або розмірністю Реньї [25].

як можливу модель, яка відображає степеневу залежність число-радіус природного об'єкта в межах обмеженого інтервалу масштабів. Однак отримана задача може бути дуже складною.

Таким чином, фізичне значення фрактального підходу дуже обмежене. Крім того, якщо фрактальне масштабування має невеликий діапазон, який охоплює лише 1,5 або 2 порядку розміру, то фрактали не забезпечують незалежного від масштабу опису шорсткості поверхні.

2.4 Застосування функції спектральної щільності потужності до шорстких поверхонь

Зараз досить популярною є інша тенденція, а саме опис шорстких поверхонь за допомогою виключно PSDF (функції спектральної щільності потужності) рельєфу поверхні. Перетворивши за Фур'є $R(\delta)$ (2), одержимо спектр потужності $G(\omega)$ або функцію спектральної щільності потужності (PSDF). Якщо частота сигналу позначити через ω , то PSDF визначається як:

$$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} R(\delta) \cos \omega \delta d\delta. \quad (5)$$

Розвиваючи підхід випадкового сигналу, Sayles і Thomas [25] представили експериментальні співвідношення між довжиною хвилі та масштабованою спектральною щільністю потужності для багатьох різних поверхонь. Вони стверджували, що масштабовані функції спектральної щільності багатьох поверхневих профілів можуть бути наближено подані як $G(\omega) = 2\pi\Lambda/\omega^2$. Сейлз і Томас [25] назвали Λ топотезою поверхні.

Borodich FM, Jin X, Repelyshev A. у [25] показали, що моделі, засновані виключно на функції спектральної щільності потужності (PSDF), досить схожі

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		33

на фрактальні моделі, і ці моделі не відображають трибологічних властивостей поверхонь. Зокрема, показано, що різні профілі можуть мати однаковий PSDF.

2.5 Висновки до розділу 2

Подано огляд математичних підходів до опису топографії інженерних поверхонь. Зазначено що, існує багато моделей випадкових процесів, але лише випадок гаусових процесів добре розроблений.

Аналіз публікацій показав, що непошкоджені поверхні досить часто є гаусовими як на мікро-, так і наномасштабах, тоді як шліфовані поверхні не є нормальними.

Перераховано деякі переваги і недоліки фрактальних підходів.

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3 Спосіб оцінки нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання

3.1 Фрактальна розмірність

Фрактальний об'єкт (профіль поверхні) має властивість самоподоби: будь-яка ділянка кривої має ту саму фрактальну розмірність, що й уся крива. Довжина фрактальної кривої (за Б. Мандельбротом [24]) визначається за формулою:

$$L = \lambda(\delta)^{1-D}.$$

Фрактальну розмірність профілю ($1 < D < 2$) можна визначити за різними способами [25]. Зокрема, фрактальна розмірність поверхні (за Б. Мандельбротом) визначається виразом:

$$D_s = D + 1.$$

Зауважимо, що наведений вираз не має наразі наукового обґрунтування.

3.2 Фрактальні моделі поверхні

Профіль інженерної поверхні може бути описаний рівнянням Вейерштрасса - Мандельброта [28]:

$$z(x) = (G)^{D-1} \sum_{n=n_1}^{\infty} \left(\cos 2\pi\gamma^n x / \gamma^{(2-D)n} \right).$$

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Тут G – фрактальний параметр шорсткості; D – фрактальна розмірність профілю; γ – масштабний параметр ($\gamma > 1$), γ^n визначає частотний спектр профілю шорсткої поверхні.

Масштабний параметр γ пов'язаний з довжиною вибірки L (відстань між двома кросоверами (повторюваний в різних масштабах об'єкт)) співвідношенням:

$$\gamma^{n_1} = \frac{1}{L}$$

До параметрів, що характеризують профіль шорсткої поверхні, слід віднести G , D і n .

На думку А. Маджумдара [19] величина $\gamma = 1,5$ є найбільш вдалим значенням для опису профілю.

Нижня межа суми в рівнянні Вейерштрасса - Мандельброта дорівнює:

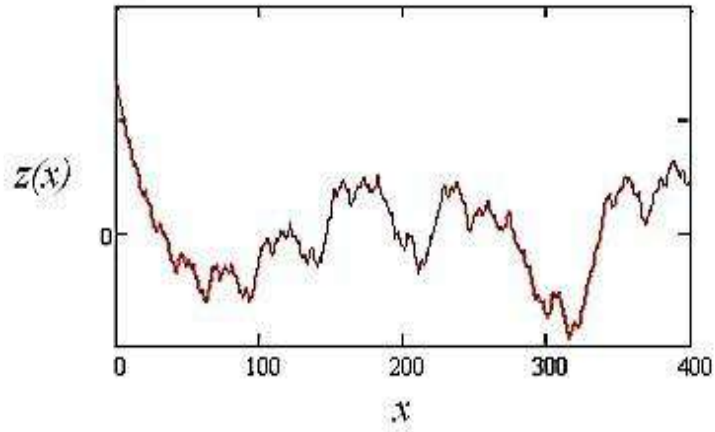
$$n_1 = \frac{\ln(1/L)}{\ln \gamma}$$

На рис. 3.1 подані профілі поверхонь для різної фрактальної розмірності, одержані за допомогою функції Вейерштрасса - Мандельброта.

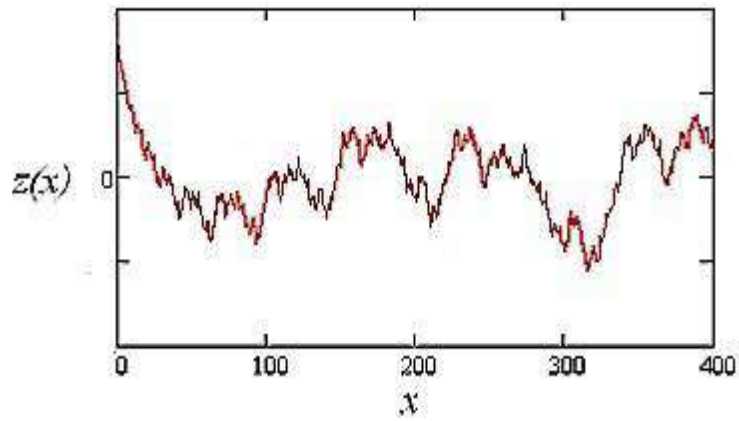
3.3 Моделювання фрактальних поверхонь

Моделювання поверхні є можливим при встановленні зв'язку фрактальної розмірності з параметрами шорсткості. У певних випадках є необхідність використовувати дані про поверхні й їх параметри. Тому визначення фрактальної розмірності типових поверхонь є необхідним для розв'язання, до прикладу, задач герметичності металевих з'єднань.

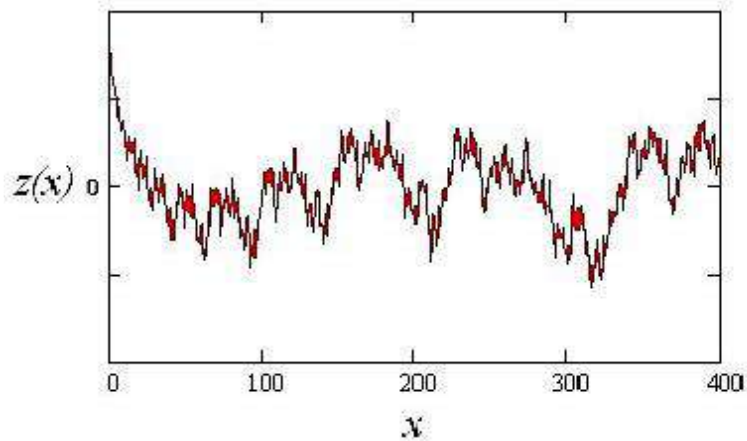
					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)



в)

Рисунок 3.1 – Профілі поверхонь за фрактальної розмірності:

а) – $D = 1,2$; б) – $D = 1,4$; в) – $D = 1,6$

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ

Арк.

37

До параметрів фрактальної поверхні, що не залежать від шкали вимірювань, відносять її розмірність і фрактальний параметр шорсткості.

Потужність спектральної функції Вейерштрасса - Мандельброта для профілю поверхні визначається виразом [24]:

$$S(\omega) = \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln \gamma} \cdot \omega^{2D-5}$$

Для поверхні ця функція має вигляд [24]:

$$P(\omega_x; \omega_{sq}) = \frac{C^{2D_s-4}}{\omega_{sq}^{8-2D_s}}.$$

Тут ω – частота, мкм^{-1} , еквівалентне значення частоти визначається частотами у взаємно перпендикулярних напрямках:

$$\omega_{sq} = \sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2}$$

Параметри G і C визначаються з рівнянь:

$$\lg S(\omega) = \lg \frac{G^{2(D-1)}}{2 \ln \gamma} - (5 - 2D) \lg \omega;$$

$$\lg P(\omega_x, \omega_y) = \lg C^{2D_s-4} - (8 - 2D_s) \lg \omega_{sq};$$

$$1 \leq D \leq 2, 2 \leq D_s \leq 3.$$

										Арк.
										38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ					

Для профілю й самої поверхні фрактальна розмірність визначається своїми кутовими коефіцієнтами K і K' (нахилом прямої, побудованої в координатах $\lg s - \lg \omega$ і $\lg P - \lg \omega$). Тоді фрактальна розмірність для ізотропної поверхні, параметри шорсткості якої можна визначити за однією профілограмою, дорівнює [28]:

$$D = \frac{5 - K}{2}.$$

Для поверхні, що має різні параметри шорсткості у двох взаємно перпендикулярних напрямках, фрактальна розмірність визначається співвідношенням [28]:

$$D_s = \frac{8 - K'}{2}.$$

У роботі [29] відзначається суттєва різниця в оцінці параметрів шорсткості при використанні фрактального й статистичного методів.

Модель фрактальної поверхні може бути подана наступним виразом [25]:

$$Z(x, y) = c_z \sum_{n=0}^{N-1} q^{(D_s-3)n} \sum_{m=1}^M \sin \left\{ Kq^n \left[x \cos \left(\frac{2\pi m}{M} \right) + y \sin \left(\frac{2\pi m}{M} \right) \right] + \theta_{nm} \right\}.$$

На рис. 3.2 подано модель поверхні, побудована для таких даних: $q=2,7$; $K=1$; $N=M=3$; $\theta_{n,m} \sim \text{ran}[0, \pi]$ – випадкове число, рівномірно розподілене на відрізок від 0 до π ; $DS=2,17$.

									Арк.
									39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ				

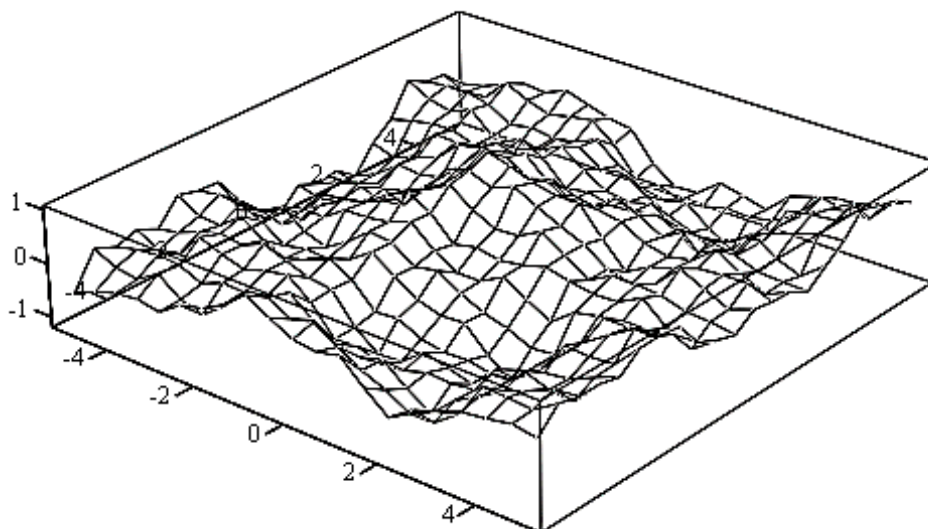


Рисунок 3.2 – Модель поверхні, побудована для параметрів:
 $q=2,7$; $K=1$; $N=M=3$; $\theta_{n,m} \sim \text{rav}[0,\pi]$; $DS=2,17$

3.4 Моделювання виступу

Процедура побудови виступу наведена на рис. 3.3.

Набір виступів, розташованих на площині серединних точок, є моделлю фрактальної поверхні. При цьому кожному виступу початково відповідає свій трикутник. Це складає опис шорсткості поверхні у вигляді випадкового поля.

Побудова поверхні (окремого виступу) методом випадкового зсуву серединної точки сторони трикутника відбувається за таким алгоритмом: у початковому трикутнику (рис. 3а) відбувається зсув трьох серединних точок його сторін вгору або вниз від площини поверхні, після з'єднання їх з вершинами формуються чотири трикутники (рис. 3б), до яких застосовується аналогічна процедура (рис. 3в).

Функція розподілу ймовірності визначає величину зсуву серединної точки й ступінь порізаності (рельєфу) поверхні.

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

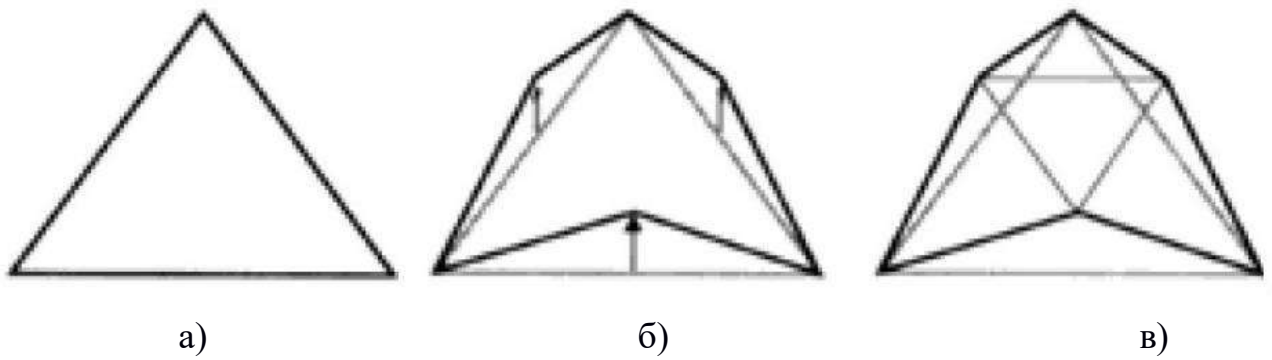


Рисунок 3.3 – Побудова виступу мікронерівності поверхні:

а), б), в) – етапи побудови

У результаті зазначених вище процедур маємо модель виступу шорсткої поверхні (рис. 3.4).

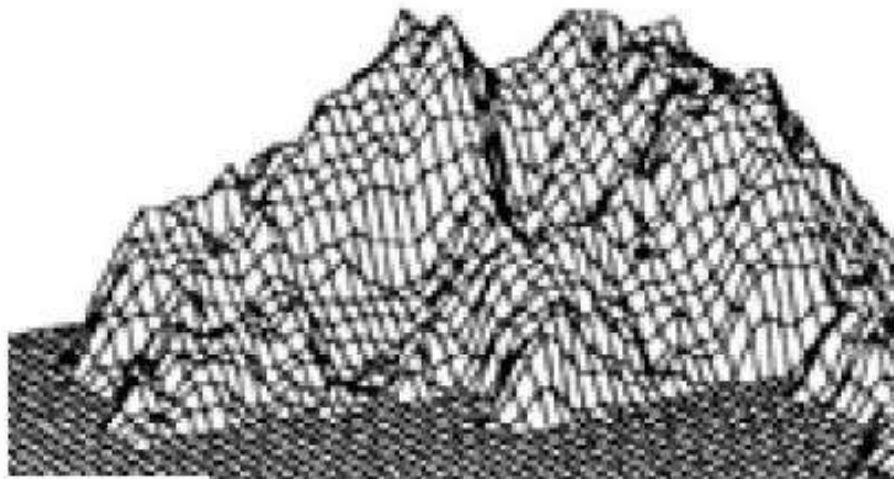


Рисунок 3.4 – Результат побудови виступу мікронерівності поверхні

До прикладу, на рис. 3.5 наведені зображення поверхні (реальної та моделі) елементів пари тертя після токарної обробки [28].

Наявність бази даних про поверхні дозволяє суттєво скоротити добір поверхонь для з'єднань, до яких висуваються вимоги щодо контактної жорсткості, площ контакту, електропровідності, тощо.

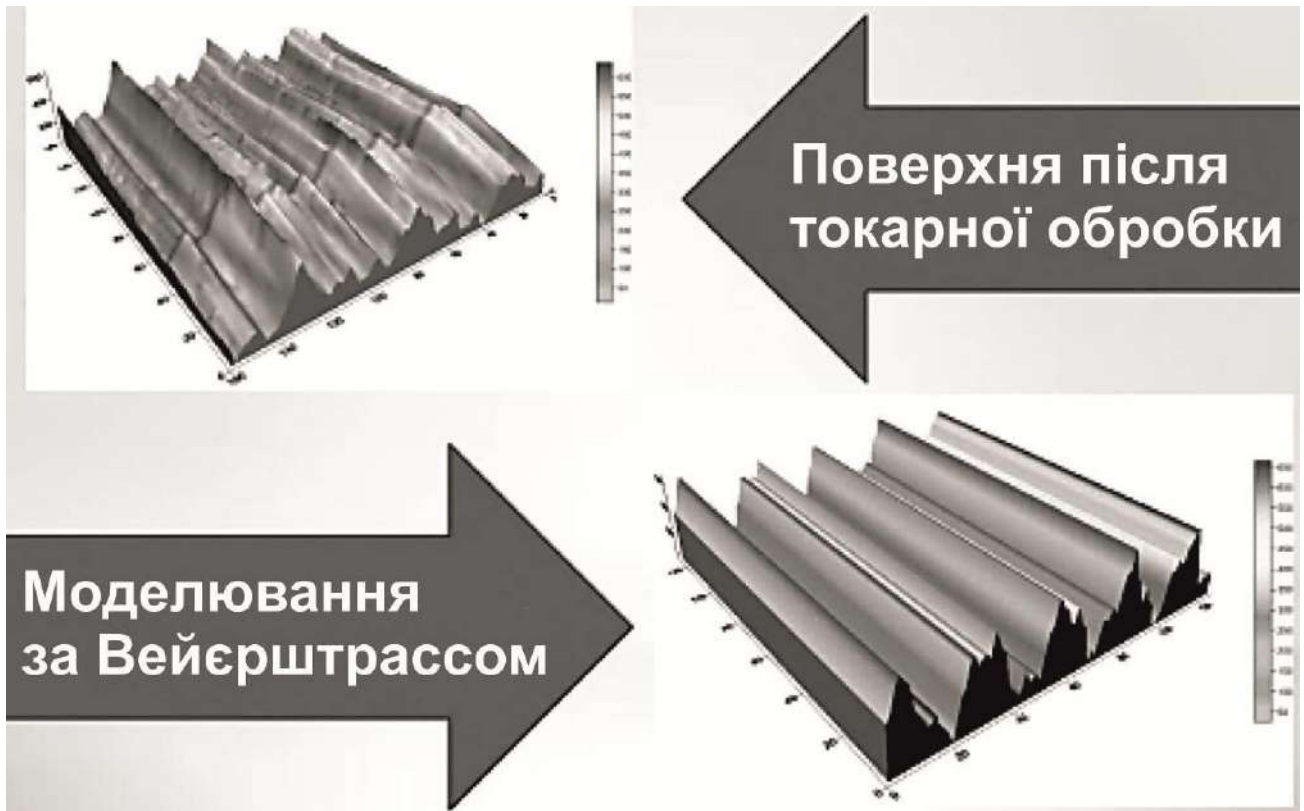


Рисунок 3.5 – Реальна поверхня й її фрактальна модель [28]

У таблиці показаний якісний вплив параметрів поверхні на трибологічні показники системи [28].

Таблиця 3.1 – Зв'язок параметрів поверхні та трибологічних показників (+ – сильний зв'язок, \pm – середній, - – слабкий) [28]

Вузол тертя й процес	Амплітудні параметри, S_a, S_z	Форма розподілу, S_{sk}, S_{ku}	Крокові параметри, S_{ds}	Гібридні параметри, $S_{\Delta q}, S_{sc}$
Підшипники	+	+	\pm	\pm
Ущільнення	+	+	\pm	+
Контактна жорсткість	+	+	\pm	\pm
Зношування	+	+	+	+
Контактна витривалість	+	\pm	\pm	-
Електроконтакти	+	+	+	+

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ

Арк.

42

3.5 Спосіб оцінки нормальної контактної жорсткості

Оцінимо нормальну контактну жорсткість для заданої інженерної поверхні при штампуванні.

Контакт фрактальних поверхонь складається з окремих плям. Розглядаючи контакт гладкої поверхні з еквівалентною, вважаємо, що існує функціональний зв'язок між площею плями контакту і радіусом верхньої частини деформованого виступу [23]:

$$R = \frac{2^D a^{\frac{D}{2}}}{\pi^{2+\frac{D}{2}} G^{D-1}}.$$

Тут a – площа розглядуваного перерізу виступу; G – фрактальний параметр, що визначається за формулою:

$$G = \left[\frac{0,9^{\frac{1}{D-1}}}{\left[\frac{1}{2D-4} \cdot (\omega_h^{2D-4} - \omega_l^{2D-4}) \right]^{1/2(D-1)}} \right] \cdot R_q^{\frac{1}{D-1}}$$

де R_q – оцінка середнього квадратического відхилення ординат профілю; ω_h, ω_l – найвища й нижча частоти профілю як випадкового процесу.

3.5.1 Взаємодія окремої сферичної нерівності із твердим штампом

Модель Маджумдара [19] припускає, що всі малі плями, обумовлені субшероватістю, спочатку деформуються пластично, а потім у міру

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

збільшення навантаження сусідні плями, зливаючись одна з одною, створюють таку площу виступу, яка деформується пружно.

Розглядаючи модель виступу з радіусом у верхній частині R , знайдемо критичну площу, досягнення якої характеризує перехід від пружного стану плями контакту до пружнопластичного:

$$a_c = \pi r \delta_c,$$

де δ_c – критична деформація [30],

$$\delta_c = \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 \cdot R.$$

Тут

$$k = 0,454 + 0,41\mu; \quad \frac{1}{E} = \frac{1 + \mu_1^2}{E_1},$$

де E , μ – модуль пружності й коефіцієнт Пуассона;

H – твердість деформованого тіла.

Виразимо критерій переходу від пружного стану контакту до пружнопластичного у вигляді:

$$\delta_c = \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 \cdot \frac{a_c^{\frac{D}{2}} \cdot 2^D}{\pi^{2+\frac{D}{2}} \cdot G^{D-1}}.$$

З урахуванням критичної деформації та співвідношення для радіуса запишемо:

					ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$a_c = \pi \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 \cdot R^2 = \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^2 \cdot \frac{a_c^D \cdot 2^{2D}}{\pi^{3+D} \cdot G^{2D-2}}.$$

Після перетворення одержимо:

$$a_c = \frac{\pi^{\frac{3+D}{D-1}} \cdot G^2}{2^{\frac{2D}{D-1}} \cdot \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^{\frac{2}{D-1}}} = \frac{\pi^{\frac{1+D}{D-1}} \cdot G^2 \cdot E^{\frac{2}{D-1}}}{4 \cdot (kH)^{\frac{2}{D-1}}}.$$

3.5.2 Основні співвідношення між навантаженням і деформацією

Зв'язок між навантаженням і деформацією, площа плями контакту в умовах пружного стану окремої нерівності у вигляді сфери із твердим штампом визначаються такими виразами [28]:

$$F_s^0 = \frac{4}{3} E \cdot R^{\frac{1}{2}} \delta^{\frac{3}{2}}, \quad a = \pi R \delta, \quad \delta \leq \delta_c;$$

$$F_s^0 = \frac{4}{3} E \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot \delta_c^{\frac{3}{2}} \cdot \delta^{*\frac{3}{2}}, \quad F_s^0 = F_c \cdot \delta^{*\frac{3}{2}}, \quad \delta^* = \frac{\delta}{\delta_c} \leq 1.$$

Беручи до уваги залежність між площею плями контакту й радіусом заокруглення верхньої частини виступу, знайдемо критичну силу:

$$F_c = \frac{4}{3} E \cdot R^{\frac{1}{2}} \delta_c^{\frac{3}{2}} = \frac{2^{2D+2} \cdot E}{3\pi^{4+D} \cdot G^{2D-2}} a_c^D \left(\frac{\pi k H}{2E} \right)^3 = \frac{2^{2D-1} \cdot a_c^D \cdot (kH)^3}{3\pi^{1+D} \cdot G^{2D-2} \cdot E^2}.$$

									Арк.
									45
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ				

$$F_s^0 = F_c \cdot \left(\frac{a}{a_c} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad \frac{a}{a_c} \leq 1.$$

Площа плями контакту дорівнює номінальній.

Жорсткість сферичної нерівності:

$$k_{N_s}^0 = \frac{dF}{A_a d\delta} = \frac{2E}{A_a} \cdot R^{\frac{1}{2}} \cdot \delta_c^{\frac{1}{2}} \cdot \delta^{*\frac{1}{2}}, \quad \delta^* \leq 1,$$

або

$$k_{N_s}^0 = \frac{2Ea}{A_a \sqrt{\pi a_c}}, \quad a \leq a_c.$$

де A_a – площа контакту.

3.5.3 Множинний контакт

Кількість плям контакту щодо максимальної плями визначається законом Корчака [23]:

$$N(A \geq a) = \left(\frac{a_L}{a} \right)^{\frac{D}{2}}.$$

Розмірний розподіл площ плям (за модулем) визначається виразом:

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n(a) = \frac{dN(A \geq a)}{da} = \frac{D}{2} a_L^{\frac{D}{2}} a^{-\left(\frac{D+2}{2}\right)}.$$

Знайдемо силу, прикладену до сполучення:

$$F = \int_0^{a_c} F_s^0(a') \cdot n(a') da'.$$

Фактична площа контакту дорівнює: $A_r = \int_0^{a_c} a' \cdot n(a') da'.$

3.5.4 Пружна контактна взаємодія фрактальних поверхонь

У випадку, коли максимальна площа плями контакту $a_l = a_c$, маємо:

$$F_s = F_c \cdot \int_0^{a_L} \left(\frac{a'}{a_c}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{D}{2} \cdot a_L^{\frac{D}{2}} \cdot a'^{-\frac{D+2}{2}} da' = F_c \cdot \frac{D}{3-D} \cdot a_c^{\frac{D-3}{2}} \cdot a^{\frac{3-D}{2}} \Big|_0^{a_L}, \quad a \leq a_L = a_c.$$

Для випадку $a = a_c$ запишемо:

$$F_s = F_c \cdot \frac{D}{3-D}.$$

При $a = a_c$ і $D = 1,5$ значення одержаного виразу відповідає значенню критичної сили. При іншому значенні фрактальної розмірності критична сила відрізняється на величину $D/(3-D)$. Це пов'язане з тим, що модель фрактальної поверхні відрізняється від відомих моделей поверхні у вигляді набору

						ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			47

сферичних сегментів, висота яких підкоряється певному закону розподілу, а радіус верхньої частини виступів сталий для всіх нерівностей.

Площа фактичного переважно пружного контакту оцінюється співвідношенням:

$$A_{rs} = \int_0^{a_L} a' \cdot \frac{D}{2} \cdot a_L^{\frac{D}{2}} \cdot a'^{-\frac{D+2}{2}} da' = \frac{D}{2-D} \cdot a_L, \quad a_L = a_c.$$

При $a_L = a_c$ одержимо $A_{rs} = \frac{D}{2-D} \cdot a_c.$

Фактичний тиск залежно від зближення дорівнює:

$$p_r = \frac{2-D}{3-D} \cdot \frac{F_c}{a_c}.$$

3.5.5 Контактна жорсткість фрактальних поверхонь

Контактна жорсткість фрактальних поверхонь виражається залежністю [28]:

$$p_r = \frac{\frac{D}{3-D} \cdot F_c \cdot a_c^{\frac{D-3}{2}} \cdot a_L^{\frac{3-D}{2}}}{\frac{D}{2-D} \cdot a_c^{\frac{D}{2}} \cdot a_L^{\frac{2-D}{2}}} = \frac{2-D}{3-D} \cdot \frac{F_c \cdot a_L^{\frac{1}{2}}}{a_c^{\frac{3}{2}}}.$$

Граничне значення тиску при пружному контакті дорівнює:

$$K_N = \int_0^{a_L} k_{Ns}^0(a')n(a')da' = \frac{4E}{A_a \sqrt{\pi}} \cdot \frac{D}{D-1} a_c^{\frac{D-1}{2}} \cdot a^{\frac{2-D}{2}} \Big|_0^{a_L}$$

При $a_L = a_c$ одержимо:

$$K_N = \frac{4E}{A_a \sqrt{\pi}} \cdot \frac{D}{D-1} a_c^{\frac{1}{2}}$$

Для розрахунків контактної жорсткості визначимо вихідні дані: середнє квадратичне відхилення ординат профілю $R_q=0,0015$ мм, фрактальна розмірність $D = 1,5$, $H=3000$ Мпа – твердість деформованої поверхні; $E=105$ Мпа – зведений модуль пружності.

Знайдемо параметр фрактальної шорсткості:

$$G = 0,0015^{\frac{1}{0,5-1}} \left[\frac{4(1,5-2) \cdot \ln(1,5)}{\left(\frac{1}{0,004}\right)^{2(1,5-1)} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^{2(1,5-1)}} \right]^{\frac{1}{2(1,5-1)}} = 9,47 \cdot 10^{-11} \text{ мм},$$

де $\omega_{\max} = \frac{1}{0,004} \text{ мм}^{-1}$; $\omega_{\min} = \frac{1}{2} \text{ мм}^{-1}$.

Критична площа контакту, що відповідає граничному пружному стану:

$$a_c = \frac{\pi^{\frac{3+1,5}{1,5-1}} \cdot (9,47 \cdot 10^{-11})^2}{2^{\frac{21,5}{1,5-1}} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 0,577 \cdot 3000}{2 \cdot 10^5}\right)^{\frac{2}{1,5-1}}} = 7,12 \cdot 10^{-4} \text{ мм}^2,$$

									Арк.
									49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ				

Номінальна площа дорівнює:

$$A_a = \left(\frac{1}{\omega_{\min}} \right)^2 = 4 \text{ мм}^2.$$

Контактна жорсткість фрактальної поверхні дорівнює:

$$K_N = \frac{4 \cdot 10^5}{4\sqrt{\pi}} \cdot \frac{1,5}{1,5-1} \sqrt{7,12 \cdot 10^{-4}} = 3,44 \cdot 10^{-3} \text{ МПа/мм} = 3,44 \text{ МПа/мкм}.$$

3.6 Висновки до розділу 3

Реалізовано спосіб оцінки нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання для визначення контактної жорсткості заданої інженерної поверхні при штампуванні.

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Висновки

Трибологія – наука про тертя, зношування, змащування та контактну взаємодію поверхонь твердих тіл при їх відносному русі. Триботехнічні показники (сумісність, зносостійкість, антифрикційність та ін.) характеризують поведінку всієї трибологічної системи в цілому. Тому встановити зв'язок між наведеними вище показниками і геометричними та/або фізико-механіко-хімічними властивостями елементів пари тертя не є можливим.

Під час експлуатації машин і приладів зовнішньому впливу, в першу чергу, піддаються поверхні їх деталей. Зношування поверхонь тертя, зародження тріщин, змінання поверхонь, корозійний і ерозійне руйнування та руйнування в результаті кавітації – це процеси, які відбуваються як на поверхнях деталей, так і прилеглому до їх поверхні шарі. Надання поверхням деталей спеціальних властивостей, сприяє суттєвому підвищенню показників якості машин і приладів, а отже і показників їх надійності.

У цій роботі подано критичний огляд деяких популярних функціональних, статистичних, фрактальних і споріднених методів моделювання та аналізу шорсткості поверхні. Пропонуються перспективні тенденції розвитку математичного моделювання в трибології, визначені на основі одержаних даних і статистики опублікованої літератури в цій галузі. Адже вибір відповідних методів характеристики поверхні та методів розрахунку для вивчення різноманітних поверхонь є головною проблемою поточних досліджень топографії інженерної поверхні.

У роботі реалізовано спосіб оцінки нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання для визначення контактної жорсткості заданої інженерної поверхні при штампуванні.

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Перелік посилань

1 Деталі машин: підручник / Міняйло А. В., Тіщенко Л. М., Мазоренко Д. І. та ін. — К.: Агроосвіта, 2013. — 448 с. — ISBN 978-966-2007-28-2

2 Антипенко А.М. та ін. Основи трибології / А.М. Антипенко, О.М. Белас, В.А.Войтов, О.С. Вотченко – Харків : ХНТУСГ, 2008. – 342 с.

3 Лекція. Вплив якості поверхні на експлуатаційні властивості деталей машин і приладів URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/ЕНК_Основи%20взаємозамінності_2017/other/ov_t7_l20.pdf (дата звернення: 15.05.2024).

4 ДСТ 2789-73. Шорсткість поверхні. Параметри і характеристики. URL: <https://inconsulting.com.ua/uk/gost/rizni-gosty/3232-gost-2789-73-shorstkist-poverxni-parametry-i-harakterystyky.html> (дата звернення: 15.05.2024).

5 Лекція. Характеристика поверхні твердих тіл URL: <http://www.tsatu.edu.ua/tstt/wp-content/uploads/sites/6/lekcija-2-harakterystyka-poverhni-tverdyh-til-z-dyscypliny-trybotehnika-133-hm.pdf> (дата звернення: 15.05.2024).

6 Деформація в системі впад від дій сили різання і зусиль закріплення URL: <https://studfile.net/preview/5740883/page:5/> (дата звернення: 15.05.2024).

7 Лекція. Контактна задача, рішення задачі посадки з натягом колеса (напівмуфти) на вал, рішення контактної задачі для сальникових та торцевих ущільнень з урахуванням таблиці властивостей матеріалів, що одержані експериментально. URL: https://elearning.sumdu.edu.ua/free_content/lectured:5ad1fb886b43a18f3b33894d16dcd2798afb3ed2/latest/859111/%D0%9A%D0%9C%D0%94%D0%A1_%D0%BB_7_.pdf (дата звернення: 15.05.2024).

8 Ramezani, M., Zaidi Mohd Ripin, T.-P., Cho-Pei J. (2023). Surface Engineering of Metals: Techniques, Characterizations and Applications. Metals 13, no. 7: 1299.

					ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

9 Borodich, F. M., Bianchi, D. (2013). Surface synthesis based on surface statistics. In Encyclopedia of Tribology, eds Q. J. Wang and Y. W. Chung (New York, NY: Springer), 3472–3478.

10 Greenwood, J.A., Williamson J.B.P. (1966). Contact of nominally flat surfaces. Proc. Roy. Soc. London. Ser. A. V. 295. P. 300-319.

11 Borodich, F. M., Savencu, O. (2017) Hierarchical models of engineering rough surfaces and bioinspired adhesives. In Bio-Inspired Structured Adhesives, eds L. Heepe, S. Gorb, and L. Xue (Springer). 179–219.

12 Whitehouse, D. J. (1982) The parameter rash—is there a cure? Wear. 83, 75–78.

13 Pawlus, P., Reizer, R., Wieczorowski, M., Królczyk, G. (2022) Parametric description of one-process surface texture.

Measurement. Volume 204. 112066.

14 Linnik, Yu. V., and Khusu, A. P. (1954) Mathematical and statistical description of unevenness of surface profile at grinding. Bul. Acad. Sci. Div. Techn. Sci. 20, 154–159.

15 Whitehouse, D. J., Archard, J. F. (1970). The properties of random surfaces of significance in their contact. Proc. R. Soc. Lond. A 316, 97–121.

16 Pawlus, P., Reizer, R., Wieczorowski, M. (2020). A review of methods of random surface topography modeling. Tribology International. Vol. 152. 106530.

17 Peng, L., Pan, B., Liu, Zhijiang, Liu, Ziyu, Tan, S. (2020). Investigation on abrasion-corrosion properties of Wc-based composite with fractal theory. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, Volume 87, 105142.

18 Zugelj, B., Kalin, M. (2017). Submicron-scale experimental and theoretical analyses of multi-asperity contacts with different roughnesses. Tribology International. 119.

19 Majumdar, A., Bhushan, B. (1990). Role of Fractal Geometry in Roughness Characterization and Contact Mechanics of Surfaces. ASME. J. Tribol. April 1990; 112(2): 205–216.

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20 Berry, M. V., Hannay, J. H. (1978). Topography of random surfaces. Nature . 273:573.

21 Jabbarov, J., Mukhtorov, D., Mustaffaqulov, M., Baxromov, A. (2023). Geometric Modeling of Self-Similar Fractal Structures. International Journal of Advance Scientific Research, 3(12), 185-197.

22 Janahmadov, A.-K., Javadov, M. (2016) Synergetics and Fractals in Tribology. Springer Cham. Springer International Publishing Switzerland. 381 p.

23 Feder, J. (2013) Fractals. Springer Science & Business Media. Springer New York, NY. 284 P.

24 Drach, I., Dykha, M., Babak, O., & Kovtun, O. (2024). Modeling surface structure of tribotechnical materials. Problems of Tribology, 29(1/111), 16–24. <https://doi.org/10.31891/2079-1372-2024-111-1-16-24>

25 Borodich, F.M., Jin, X., Pepelyshev, A. (2020) Probabilistic, Fractal, and Related Techniques for Analysis of Engineering Surfaces. Front. Mech. Eng. 6:64.

26 Zhang, B., Zhou L. (2021). Feature Analysis of Fractal Surface Roughness Based on Three-dimensional W-M Function. J. Phys.: Conf. Ser. Vol. 1906. 012020.

27 Al-Quraan, T. M.A., Ilina, O., Kulyk, M. et. al. (2023) Dynamic processes of self-organization in non-stationary conditions of friction. Advances in Tribology, Vol. 2023.

28 Tikhomirov V.P., Izmerov M.A. Fractal model of elastoplastic contact of nominally flat rough surfaces // Advances in Engineering Research: Proceed-ings of the international conference on aviamechan-ical engineering and transport (AVIAENT 2019). 2019. Vol. 188. P. 344-350.

29 Pavelescu D. On the roughness fractal character, the tribological parameters and the error factors / D. Pavelescu, A. Tudor // Proceedings of the Romanian Academy. Ser. A. - 2004. - Vol. 5. - № 2.

30 Kogut L. Elastic-plastic contact analysis of a sphere and a rigid flat / L. Kogut, I. Etsion // Journal of Applied Mechanics. - 2002. - Vol. 69. - № 5.

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						55
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Додаток А

Презентаційний матеріал

Кафедра трибології, автомобілів
і матеріалознавства

ВИЗНАЧЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ЖОРСТКІСНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФРАКТАЛЬНО ЗМОДЕЛЬОВАНОЇ ПОВЕРХНІ КОНСТРУКЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ

Студента групи МТВА-20-1
Левчука В.М.

Науковий керівник
д.т.н., доцент Драч І.В.

Об'єкт дослідження – жорсткісні властивості
поверхні конструкційного матеріалу.

Предмет дослідження – фрактальне
моделювання поверхні конструкційного матеріалу.

Мета дослідження – розробка способу
визначення нормальних жорсткісних властивостей
поверхні конструкційного матеріалу засобами
фрактального моделювання.

2

Завдання дослідження :

- 1) подати огляд розвитку досліджень існуючих методів моделювання у галузі трибології;
- 2) проаналізувати класифікацію методів фрактального аналізу структури інженерних поверхонь контакту;
- 3) розглянути хід дослідження й етапи фрактального моделювання;
- 4) розробити спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання;
- 5) реалізувати спосіб визначення нормальних жорсткісних властивостей фрактально змодельованої поверхні конструкційного матеріалу.

3

					<i>ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ</i>	Арк.
						56
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати аналізу предметної області

1. Шорсткість поверхні деталей – сукупність виступів і впадин, що має випадкову форму і розподіл.
2. Ступінь шорсткості визначається видом і умовами обробки і складання.
3. В стиках шорстких поверхонь контактування носить дискретний характер і контактні деформації деталей визначаються деформуванням мікро- і макровиступів поверхонь.
4. Підвищення надійності технічних систем є неможливим без поглибленого вивчення процесів, що відбуваються на поверхнях тертя; розвитку фізичних уявлень про тертя й зношування; застосування сучасних методів досліджень, заснованих на результатах і методах, використовуваних у класичних фундаментальних і прикладних фізико-математичних науках; використання комп'ютерних технологій.
5. Шорсткість технічних поверхонь є вирішальним чинником для продуктивності трибологічних компонентів. На розсіювання енергії під час ковзання сухих інженерних поверхонь і, відповідно, на тертя вплив має профіль поверхні.
6. У контактних задачах для досягнення сумісності на стику використовують контактну жорсткість.
7. На точність обробки впливають переважно ті деформації системи, які змінюють відстань між кромкою інструменту та оброблюваною поверхнею, тобто деформації, направлені нормально до оброблюваної поверхні.

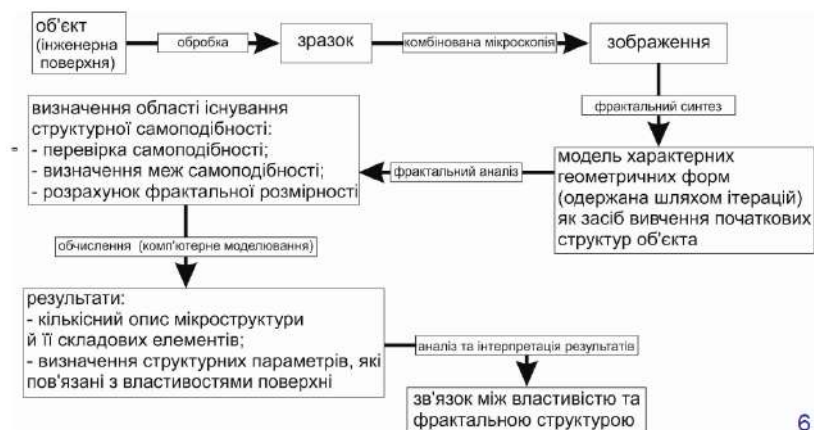
4

Математичні підходи до опису рельєфу інженерних поверхонь

1. Сучасне математичне моделювання при вивченні механізму контакту і руйнування інженерних поверхонь тертя розвивається за такими основними напрямками: статистичне моделювання, стохастичне моделювання, топологічне моделювання, фрактальне моделювання.
2. Непошкоджені поверхні зазвичай є гаусовими як на мікро-, так і наномасштабах, тоді як шліфовані поверхні не є нормальними (гаусовими).
3. Вибір відповідних методів визначення характеристики поверхні та методів розрахунку для вивчення інженерних поверхонь є головною проблемою поточних досліджень топографії інженерної поверхні.

5

Етапи дослідження структурних характеристик інженерної поверхні на основі фрактального моделювання



6

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ

Арк.

57

Спосіб оцінки нормальної контактної жорсткості інженерної поверхні при штампуванні

1. Означення фрактальної розмірності;
2. Вибір фрактальні моделі поверхні;
3. Моделювання фрактальної поверхні – аналітичний опис поверхні;
4. Моделювання виступу;
5. Оцінка нормальної контактної жорсткості інженерної поверхні:
 - 5.1. Моделювання взаємодії окремого сферичного виступу поверхні із твердим штампом;
 - 5.2. Аналітичний опис множинного контакту на основі співвідношень між навантаженням і деформацією;
 - 5.3. Оцінка контактної жорсткості фрактальної поверхні на основі аналітичного виразу для пружної контактної взаємодії фрактальних поверхонь.

7

Алгоритм розрахунку оцінки нормальної контактної жорсткості інженерної поверхні при штампуванні

Початкові умови:

фрактальна модель - Вейерштрасса-Мандельброта; фрактальна розмірність – $D = 1,5$;
 середнє квадратичне відхилення ординат профілю – $R_q = 0,0015$ мм;
 твердість деформованої поверхні – $H = 3000$ Мпа;
 зведений модуль пружності – $E = 105$ Мпа;

Розв'язання:

- найвища й нижча частоти профілю як випадкового процесу: $\omega_{max} = \frac{1}{0,004}$ мм⁻¹; $\omega_{min} = \frac{1}{2}$ мм⁻¹;
- параметр фрактальної шорсткості: $G = \left[\frac{0,9^{\frac{1}{D-1}}}{\left[\frac{1}{2D-4} \cdot (\omega_h^{2D-4} - \omega_l^{2D-4}) \right]^{\frac{1}{2(D-1)}}} \right] \cdot R_q^{\frac{1}{D-1}} = 9,47 \cdot 10^{-11}$ мм,
- критична площа контакту, що відповідає граничному пружному стану: $a_c = \frac{\pi^{\frac{1-D}{2}} \cdot G^2 \cdot E^{\frac{2}{D-1}}}{4 \cdot (kH)^{\frac{2}{D-1}}} = 7,12 \cdot 10^{-4}$ мм²,
- номінальна площа контакту: $A_s = \left(\frac{1}{\omega_{min}} \right)^2 = 4$ мм²,
- контактна жорсткість фрактальної поверхні: $K_N = \frac{4E}{A_s \sqrt{\pi}} \cdot \frac{D}{D-1} a_c^{\frac{1}{2}} = 3,44$ МПа/мкм.

8

Висновки

1. Триботехнічні показники характеризують поведінку всієї трибологічної системи в цілому, тому встановити зв'язок між цими показниками і геометричними та/або фізико-механіко-хімічними властивостями елементів пари тертя не є можливим.
2. Під час експлуатації машин і приладів зовнішньому впливу, в першу чергу, піддаються поверхні їх деталей. Визначення спеціальних властивостей поверхонь деталей сприяє суттєвому підвищенню показників якості машин і приладів, а отже і показників їх надійності.
3. У роботі подано критичний огляд деяких функціональних, статистичних, фрактальних і споріднених методів моделювання та аналізу шорсткості поверхні.
4. У роботі реалізовано спосіб оцінки нормальних жорсткісних властивостей поверхні конструкційного матеріалу засобами фрактального моделювання для визначення контактної жорсткості інженерної поверхні із заданими параметрами при штампуванні.

9

					ДРМТВАТАМ 24 20213. 000 ПЗ	Арк. 58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		