

УДК 621.891

В.В. Аулін, проф., канд. фіз-мат. наук, С.М. Лізунов, ас.
Кіровоградський національний технічний університет

Дослідження мікрогеометрії поверхонь тертя деталей фрактальним методом

В статті мікрогеометрію поверхонь деталей, зміцнених та модифікованих сучасними технологіями, запропоновано досліджувати за допомогою фракталів. Показано, що механічні і сучасні методи обробки робочої поверхні деталей створюють принципово різні елементи топографії. **мікрогеометрія, зміцнення, модифікування, фрактальний метод, шорсткість, фрактали, фізико-хімічні методи обробки**

Створення робочих поверхонь з властивостями, необхідними для стабільного функціонування деталей та їх сполучень в процесі експлуатації є нагальною необхідністю технологічного управління якістю їх поверхонь.

При виготовленні відповідальних деталей, що працюють в умовах високих навантажень і підвищених температур, необхідно дотримуватись заданих параметрів якості поверхневого шару, таких як шорсткість поверхні, глибина і ступінь наклепування, залишкові напруження.

Якість поверхні традиційно характеризується шорсткістю (середнім арифметичним відхиленням профілю R_a , максимальною висотою нерівностей R_{max} , середнім кроком нерівностей профілю S_m і т.п.) і фізико-механічними властивостями поверхневого шару [1].

Шорсткість є одним з найбільш інформативних показників, що характеризують нормальний режим роботи сполучень деталей. Від шорсткості поверхні залежать величина сили тертя та зносостійкість рухомих трибосполучень деталей.

Шорсткість поверхні розглядається як статичний об'єкт, що реагує на фізичний процес її обробки, тобто результат впливу на оброблюваній поверхні, закріпленій елементами мікрогеометрії, апроксимованими простими геометричними тілами – сферами, конусами, циліндрами і т.п. При цьому вплив на шорсткість оцінюється тільки через деякі технологічні параметри режиму обробки.

Разом з тим, не маючи методики оцінки топографічних властивостей поверхні деталі і її геометричних характеристик, що адекватно відображають реальні процеси формування поверхневого рельєфу, неможливо з достатньою достовірністю передбачити поведінку цієї поверхні в процесі експлуатації деталі.

Зазначене обумовлює розробку нових підходів в оцінці шорсткості поверхні (принаймні, відносно певної групи поверхонь). Одним з можливих напрямів такого підходу є використання теорії фракталів. В якості оцінного кількісного параметру може слугувати фрактальна (дробова) розмірність D і фрактальні сигнатури [2]. Такий підхід дозволить внести до оцінки шорсткості поверхні властивість універсальності.

Метою даної роботи є аналіз різноманітності елементів топографії робочої поверхні деталі, одержаної в процесі її зміцнення і модифікування та використання теорії фракталів в оцінці шорсткості поверхні.


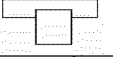

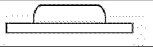

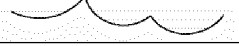
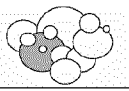
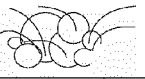


Елементи топографії поверхонь деталей та їх фрактальне уявлення. Інтенсивний розвиток методів обробки концентрованими потоками енергії (КПЕ)

(лазерною, плазмовою, електроерозійною та ін.), а також нанотехнологій (хімічна збірка, золь-гель процеси, парофазне осадження металів, атомно-шарова епітаксія та ін.) обумовлює виникнення певних ускладнень в описі і оцінці шорсткості робочих поверхонь деталей профільним методом. Форма елементів шорсткості, їх розподіл на оброблюваній поверхні суттєво відрізняються від традиційного уявлення про них, сформованого при процесах механічної обробки, як про періодичне чергування "виступів" і "западин", що описуються в межах евклідової геометрії.

Аналогічну форму мають мікроелементи поверхні, на яку впливали інтенсивними потоками енергії різної природи, високим тиском, високошвидкісними газовими середовищами, комбінаціями механічних, ультразвукових та інших коливань. Розподіл цих елементів на оброблюваній поверхні не носить періодичного характеру і має різну щільність імовірності розподілу. У таких випадках дуже важко або зовсім неможливим є використання для опису шорсткості поверхні класичних геометричних параметрів, а для оцінки топографічних властивостей поверхні – кривої опорної поверхні Аббота-Файерстоуна [1].

При обробці поверхні КПЕ виявлено, що найбільш повторювальними елементами топографії є елементи відображені в таблиці 1.

Таблиця 1 - Різноманітність елементів топографії робочої поверхні деталі

Назва	Види елементів мікрорельєфу
Грибоподібний	
T-подібний	
Списи	
Сплети	
Ботіроїдальні	
Лунки	
Глобули	
Віспери	
Гребені	
Муар	

Для ідеальної фрактальної шорсткої поверхні передбачається наявність нерівностей всіх масштабів. У випадку моделі з фрактальними висотами нерівностей слід враховувати її недиференційованість. При цьому виключаються поняття нормалі до фронту розсіяваної хвилі, променевої траєкторії і ефектів геометричної оптики, а для моделі з фрактальними нахилами нерівностей допускається існування тільки першої похідної. Тому для фрактального рельєфу нахили, кривизна і розподіл екстремумів не є істотними властивостями поверхонь.

Новітні технології при впливі ззовні на всю оброблювану поверхню груповими процесами, які її трансформують, створюють кластерні структури [4]. Такі

перетворення топографії поверхні потребують нових підходів в прогнозуванні властивостей кластерних утворень та їх кількісних параметричних оцінок, що базуються на синергетиці.

Успішно застосовують теорію фракталів в матеріалознавстві для розв'язання задач, пов'язаних з отриманням матеріалів із заданими властивостями. При цьому характерним є те, що теорія фракталів органічно об'єднана з уявленнями про синергетику, як теорію самоорганізуючих структур. Теорію фракталів можна використати для кількісного опису дисипативних структур, що формуються в умовах, далеких від врівноважених станів. Зазначений підхід дозволив виділити напрям в науці про матеріали – фрактальне матеріалознавство [2]. Фрактальне матеріалознавство дає можливість встановити функціональні зв'язки між складом, фрактальною структурою і властивостями матеріалу.

Якщо розуміти під динамічною системою (ДС) об'єкт або процес, для якого однозначно визначено стан або сукупність деяких величин в заданий момент часу і задано детермінований оператор еволюції, то це поняття можна розповсюдити на об'єкти будь-якої природи. Властивості ДС визначаються такими інваріантами, як показник Ляпунова, фрактальна розмірність дивного аттрактора, ентропія. Знання цих величин дозволяє визначити кількість незалежних змінних і встановити кінцеву міру даного явища. У фазовому просторі систем після затухання перехідних процесів можна виділити граничну множину точок, що притягає фазові траєкторії (аттрактор). Існування аттракторів пов'язане з властивостями стиснення фазового об'єму ДС під дією оператора еволюції. Ця множина у фазовому просторі ДС характеризується режимом сталих неперіодичних коливань (дивний аттрактор) [5]. Дивний аттрактор завжди має дробову фрактальну розмірність D .

Важливою особливістю хаотичного руху є надзвичайна чутливість до малих змін в початкових умовах. Це означає, що дві близько розташовані траєкторії у фазовому просторі експоненціально розбігаються в часі. Кількісна оцінка швидкості їх розбігання подається в термінах показників Ляпунова, які є повною характеристикою ступеня складності хаотичної поведінки і структури аттрактора у фазовому просторі ДС. Самим найзначущим серед них є максимальний ляпуновський показник λ_1 , позитивність якого свідчить про існування хаосу в ДС. Геометрія і динаміка дивних аттракторів тісно зв'язані між собою: за показниками Ляпунова можна судити про геометрію аттрактора, а вимірюючи фрактальну розмірність D , отримати відомості про значення ляпуновських показників ДС.

Основою дослідження фізико-хімічних процесів в поверхневих шарах матеріалів деталей при технологічних методах обробки є термодинаміка, що дозволяє встановити загальні закономірності поведінки систем з великого числа частинок незалежно від специфічних особливостей механізму процесів, що протікають в них. Стан термодинамічної рівноваги характеризується умовою рівноваги:

$$S(U, V, n_i) = \max ; dS = 0, \quad (1)$$

де U – внутрішня енергія;

S – ентропія;

V – об'єм;

n_i – число молей для компонентів ($i = 1, 2, \dots$).

Із зазначеної умови випливає, що термодинамічна рівновага відповідає найбільшому ступеню неупорядкованості, а рушійною силою врівноважених процесів є прямування системи до мінімуму вільної енергії. Зняти існуючі суперечності дозволяє

синергетика - теорія самоорганізації, або теорія дисипативних систем, теорія відкритих систем, теорія внерівноважених систем, інформаційна динаміка, динамічна теорія формоутворення і т.п. До основних її принципів відносяться: мінімум виробництва ентропії; поточна і локальна рівновага; нерівноважена термодинаміка; найменше примушення; підпорядкування; "нерівноваженість – джерело впорядкованості" [5-8].

Ці принципи можуть бути поширені як на живу, так і неживу матерію, а еволюційне рівняння є однаковим і має вигляд:

$$\frac{dc}{dt} = \alpha c, \quad (2)$$

де $\frac{dc}{dt}$ – швидкість утворення деякої речовини;

c – концентрація;

α – параметр порядку.

Оскільки синергетичним системам властива стохастичність, то рівняння (2) набуває вигляду:

$$\frac{dc}{dt} = \alpha c + f(t), \quad (3)$$

де $f(t)$ - флуктуація сил.

Аналізуючи відмінності в механізмах формування шорсткості поверхні фізико-хімічними і механічними методами, можна відзначити, що в останньому випадку шорсткість є слідом інструменту впливу на оброблювану поверхню, що розгортається послідовно в часі і просторі. При фізико-хімічних методах обробки інструментом є по суті саме робоче середовище (рідина, газ, пари металів та енергетичні поля). Елементи поверхні при цьому активізовані високими температурою, тиском, різного роду полями. Спостерігається інтенсивна взаємодія зі всією оброблюваною поверхнею матеріалу майже одночасно в безлічі точок свого розташування в робочому просторі. Тобто створюється так званий ефект групової дії на оброблювану поверхню. Виходячи з цього, поверхню деталі, сформовану за допомогою фізико-хімічних методів обробки, можна уявити як результат дії на матеріал цілої сукупності процесів, обумовлених накладенням різного роду активізуючих чинників, і розглядати її як синергетичну систему.

Між теорією фракталів, що спирається на геометрію і теорію розмірності, і теорією динамічного хаосу існує тісний зв'язок. Теорія фракталів розглядає замість цілочисельних дробові розмірності і базується на нових кількісних показниках у вигляді дробових розмірностей D і відповідних сигнатур, що характеризують просторовий фрактальний кепстр [9]. Фрактальні дробові розмірності і сигнатури D не тільки характеризують топологію об'єктів, але і відображають процеси еволюції динамічних систем і пов'язані з їх властивостями. Теорія фракталів і нелінійність складають геометрію хаосу, тобто, фрактали – це не тільки мова хаосу, але і мова природи. За своїм змістом контури всіх природних об'єктів суть динамічні процеси, що раптово застигли у фізичних формах і об'єднують в собі стійкість і хаос. Порядок і Хаос – основні взаємозалежні тенденції, особливо в еволюції складних відкритих ДС. При цьому біфуркації асоціюються з катастрофічними змінами або конфліктами. Наявність нелінійності означає можливість несподіваних змін перебігу процесу. Між

точками біфуркацій відкрита система підкоряється детерміністичним законам, а в околі таких точок тільки флуктуації визначають поведінку системи. Тому така велика роль флуктуацій в околі точок біфуркації. Хаотичні процеси на мікрорівні можуть піднятися на макрорівень і впливати на всю систему. При цьому здатність відкритої системи знаходитися в режимі детермінованого хаосу стимулює інформаційні процеси незалежно від початкових умов. Це відноситься в загальному випадку до будь-яких відкритих систем [9].

Можна відзначити, що одним з найважливіших питань фрактальної геометрії є зв'язок фракталів і текстур [2, 5-9].

Виходячи з роботи [3] формалізоване математичне визначення фракталу функціонального відображення, або множина, що отримується нескінченним рекурсивним процесом, має наступні властивості:

- самоподібність, або масштабна інваріантність (нескінченний скейлінг) і фрактали на малих масштабах виглядають в середньому так само, як і на великих;
- їх дробова розмірність (розмірність Хаусдорфа);
- недиференційованість і оперування дробовими похідними і інтегралами.

Фізичне визначення фрактала наступне: фрактали – це геометричні об'єкти (лінії, поверхні, тіла), що мають сильно порізану структуру і що володіють властивістю самоподібності в обмеженому масштабі.

Процес формування рельєфу поверхні (зокрема, шорсткості), що описується в межах фрактального аналізу, можна розкрити, враховуючи природу процесів, що лежать в основі сучасних технологічних методів обробки. Спектр цих методів вельми широкий по своїй кінцевій меті і по закладеним в них фізичних основ [10].

За механізмами формування шорсткості поверхні фізико-хімічні методи обробки можна поділити на три основні класи: клас А – методи, при яких формування поверхні здійснюється за рахунок процесів знімання поверхневих шарів матеріалу при незмінному основному матеріалі; клас В – методи, що формують властивості поверхні за рахунок процесів нанесення (осадження) матеріалу на основний матеріал деталі, його частковій дифузії в поверхневі шари і зміни властивостей поверхні при незмінній матриці; клас С – методи, що дозволяють формувати структури, що виконують функції як матриці, так і поверхні одночасно за рахунок надмініатюрних розмірів таких структур (нанотехнології).

Аналізуючи процеси, що протікають при лазерній обробці, можна відзначити, що вони характеризуються формуванням в зоні обробки низькопорогового оптичного пробою (10^{-8} с) і утворенням плазмової хмари ($10^{-6} \dots 10^{-5}$ с). Взаємодія оброблюваного матеріалу з тепловими потоками щільністю від 10^2 до 10^5 Вт/м² в середовищі активних (N₂, CO₂, H₂, СО, метан), а також інертних газів (Аг, Не, Хе) приводить до формування на поверхні матеріалу теплового джерела, сприяючого створенню специфічної морфології, що є проявом різного роду нестійкостей.

При лазерній обробці в імпульсному режимі (тривалість імпульсу порядку $10^{-6} \dots 10^{-9}$ с) відбувається процес як теплового, так і динамічного руйнування матеріалів при дії теплового удару в діапазоні часу дії $t = 10^{-7} \dots 10^{-10}$ с. Сам каскад центрів руйнування, що виникають в процесі динамічного руйнування, можна розглядати як фрактальний кластер. При імпульсному розігріванні матеріалу діє динамічний режим навантаження, при якому відбувається перехід від одноосередкового механізму руйнування до характерного багатоосередкового. Кінетика процесу динамічного руйнування може бути визначена дією концентраційного процесу (що є перколяційним за своєю природою) розвитку центрів руйнування на різних масштабних рівнях.

При лазерному зміцненні сплавів встановлено, що наслідком дії концентрованих потоків енергії на оброблювану поверхню можуть бути або утворення флуктуаційного нерегульованого виникнення і росту зародків нової фази (що указує на хаотичний перебіг процесу), або зсувного, впорядкованого, що характеризується кооперативним переміщенням атомів на певній відстані. Останнє може бути пов'язане з самоорганізуючими процесами, що цілком узгоджується з синергетичним підходом в матеріалознавстві.

Висновки. Більшість процесів, що лежать в основі фізико-хімічних методів обробки поверхні описуються динамічно-неврівноваженими принципами синергетики й утворюють так звані нерівноважені технології зміцнення і модифікування поверхонь деталей. Такі процеси викликають, як правило, утворення дисипативних структур, що вимагають для свого існування постійної притоки енергії та речовини ззовні. Притока забезпечується за рахунок електричної, теплової, світлової і т.п. енергії, що вводиться в зону обробки спеціальними пристроями (джерелами живлення, електронними гарматами, системами накачування і так далі). Спираючись на уявлення про процеси, далекі від врівноваженого стану, необхідно ввести для їх опису теорію фракталів, а для кількісної оцінки мікрогеометрії поверхні – фрактальну (дробову) розмірність D , або фрактальні сигнатури.

Список літератури

1. Демкин Н. Б. Качество поверхности и контакт деталей машин / Н. Б. Демкин, Э. В. Рьжов. – М.: Машиностроение, 1981. – 244 с.
2. Синергетика и фракталы в материаловедении / [Иванова В. С., Баланкин А. С., Бунин И. Ж., Оксогоев А. А.]. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
3. Потапов А. А. Исследование микрорельефа обработанных поверхностей с помощью методов фрактальных сигнатур / А. А. Потапов, В. В. Булавкин, В. А. Герман, О. Ф. Вячеславова // Журнал технической физики. – 2005. – Т. 75, № 5. – С. 28–45.
4. Гленсдорф П. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуации / П. Гленсдорф, И. Пригожин – М.: Мир, 1973. – 280 с.
5. Хакен Г. Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – 400 с.
6. Эбелинг В. Образование структур при необратимых процессах. Введение в теорию диссипативных структур / В. Эбелинг. – М.: Мир, 1979. – 279 с.
7. Николис Г. Самоорганизация в неравновесных системах. От диссипативных структур к упорядочению через флуктуации / Г. Николис, И. Пригожин. – М.: Мир, 1979. – 512 с.
8. Климонтович Ю.Л. Статистическая теория открытых систем / Ю. Л. Климонтович. – М.: Янус, 1995. – Т. 1. – 624 с.; 1999. – Т. 2. – 440 с.; 2001. – Т.3. – 508 с.
9. Бонюшкин Е. К. Нелинейная динамика, фракталы и нейронные сети в системах и технологиях: под ред. Ю. Г. Кабалдина / Е. К. Бонюшкин, Н. И. Завада, Л. А. Платонова [и др.] – Владивосток, 2002. – С.123–171.
10. Кокора А. Н. Физико-химические процессы обработки материалов концентрированными потоками энергии / А. Н. Кокора, Э. Н. Соболев. – М.: Наука, 1985. – С. 54–65.

В. Аулин, С.Лизунов

Исследование микрогеометрии поверхностей трения деталей фрактальным методом

В статье микрогеометрию поверхности деталей, упрочненных и модифицированных современными технологиями, предложено исследовать с помощью фракталов. Показано, что механические и современные методы обработки рабочей поверхности деталей образуют принципиально разные элементы топографии.

V. Aulin, S. Lizunov

Research of microgeometry of of surfaces of friction of details by and fractal method

In clause microgeometry of a surface of details, hardening and the updating by modern technologies, is offered to investigate with the help fractals. Is shown, that the mechanical and modern methods of processing of a working surface of details form essentially different elements of topography.

Одержано 18.09.09