

УДК 620.179.1

М.В. Карускевич, канд. техн. наук
О.Ю. Корчук
Т.П. Маслак
Чжан Чжао Хуей (Китай)

ФРАКТАЛЬНІСТЬ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ ПОЛІКРИСТАЛІЧНОГО АЛЮМІНІЮ

НАУ, кафедра конструкцій літальних апаратів
 E-mail: vbif@i.com.ua

Розглянуто можливість застосування методів фрактальної геометрії для аналізу поверхневих деформаційних структур, які формуються в результаті дії циклічного навантаження. Показано, що деформаційний рельєф поверхні плакованих конструкційних алюмінієвих сплавів відповідає критеріям фрактальності, а для визначення фрактальної розмірності може бути застосовано метод "box-counting".

The possibility of the fractal geometry method application for the analysis of surface deformation structures under cyclic loading is presented. It is shown, that deformation relief of the clad aluminium alloys meets the criteria of the fractality. For the fractal dimension estimation the method of "box-counting" can be applied.

Постановка проблеми

Одним зі шляхів моніторингу накопиченого втомного пошкодження елементів авіаційних конструкцій є оптичний контроль стану поверхні та кількісна оцінка параметрів деформаційного рельєфу [1; 2], який формується і розвивається в результаті дії циклічного навантаження.

Перевага оптичної діагностики – можливість безпосереднього спостереження ознак накопиченого пошкодження, використання досвіду оператора для первинного аналізу і фільтрації візуальної інформації, відсутність пристроїв перетворення інформації та відповідних додаткових похибок.

Деформаційний рельєф формується на поверхні як монокристалів, так і конструкційних полікристалічних матеріалів. Діагностичним кількісним параметром може бути щільність смуг ковзання при спостереженні за поверхнею монокристалів, або насиченість поверхні ознаками локалізованої деформації.

Параметр пошкодження D визначається як відношення площі поверхні з ознаками рельєфу до загальної площі, що контролюється [2]. Оптичний контроль виконується за допомогою металографічного мікроскопа, обладнаного цифровою камерою.

Для автоматизованої оцінки параметра пошкодження розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє проводити обробку фотографій в форматі BMP і визначати параметр пошкодження D . Моніторинг доцільно виконувати поблизу концентратора напружень, тобто місця потенційного формування втомної тріщини.

Як показали дослідження еволюції деформаційного рельєфу плакованих алюмінієвих сплавів Д-16АТ вітчизняного виробництва, а також

сплавів 2024 Т3 та 7075 Т6, які широко використовуються в західному авіаційному будівництві, використання параметра D дозволяє в певному діапазоні умов навантаження прогнозувати залишковий ресурс елементів авіаційних конструкцій, які виготовлені з плакованих алюмінієвих сплавів [2–6].

Приклад проведеного моніторингу втомного пошкодження зображено на рис. 1.

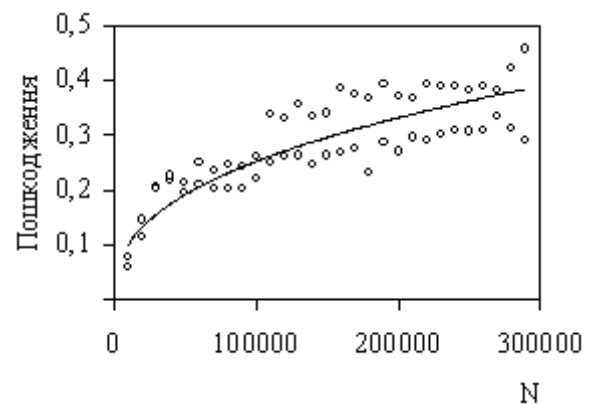


Рис. 1. Залежність параметра пошкодження D від кількості циклів навантаження N

Зразок сплаву Д-16АТ випробували в умовах циклічного віднульового розтягування. Максимальне напруження циклу навантаження становило 81,7 МПа, частота навантаження – 11 Гц. Моніторинг деформаційного рельєфу проводився поблизу концентратора напружень у вигляді отвору діаметром 4 мм.

Для підвищення точності прогнозу доцільно розглянути можливість застосування додаткових діагностичних параметрів, що базуються на кількісному аналізі геометрії дефектних структур поверхні металів при їх циклічному навантаженні.

Фрактальна геометрія природних об'єктів

Ключовим поняттям одного з нових і перспективних підходів опису структур та процесів природного походження фрактальної геометрії, є фрактальна розмірність [7], яка здатна набувати не тільки цілі значення.

Фрактал-структура складається з частин, які подібні цілому, і має фрактальну розмірність, а фрактальність – властивість об'єкта бути фракталом чи розмірності бути фрактальною.

Фрактальна розмірність дозволяє виміряти ступінь хвилястості, неоднорідності об'єкта. Вона збільшується за зростанням хвилястості, тоді як топологічна розмірність не враховує всі зміни, що відбуваються з лінією чи поверхнею, якщо тільки вони не супроводжуються розривом або об'єднанням якихось точок.

Збільшуючи своє значення, фрактальна розмірність не змінює його стрибком, а бере дробові значення.

Класичним прикладом визначення фрактальної розмірності реальних об'єктів є визначення довжини берегової лінії [7].

Для вимірювання довжини берегової лінії карта покривається сіткою (рис. 2).

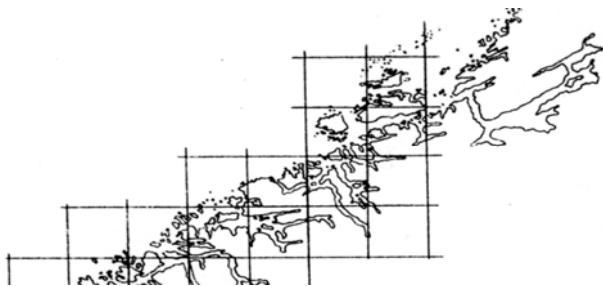


Рис. 2. Покриття сіткою контуру берегової лінії для визначення довжини

Нехай квадратні комірки сітки мають розміри $s \times s$. Кількість $N(s)$ таких комірок, необхідних для покриття берегової лінії на карті, приблизно дорівнює кількості кроків, за якої можна обійти по карті берегову лінію циркулем з розхилом s . Зменшення s приводить до збільшення кількості комірок, необхідних для покриття берегової лінії.

Якби берегова лінія мала цілком визначену довжину L_N , то можна було б очікувати, що кількість кроків циркуля чи кількість квадратних комірок $N(s)$, необхідних для покриття берегової лінії на карті, буде обернено пропорційна s , а величина $L(s) = N(s) \times s$ у разі зменшення s буде прагнути до сталої L_N .

Однак, як видно з рис. 2, при зменшенні довжини s кроку виміряна довжина збільшується.

Графік, побудований у подвійному логарифмічному масштабі (рис. 3), показує, що у разі зменшення s виміряна довжина берегової лінії описується наближеною формулою

$$L(s) = a s^{1-D}$$

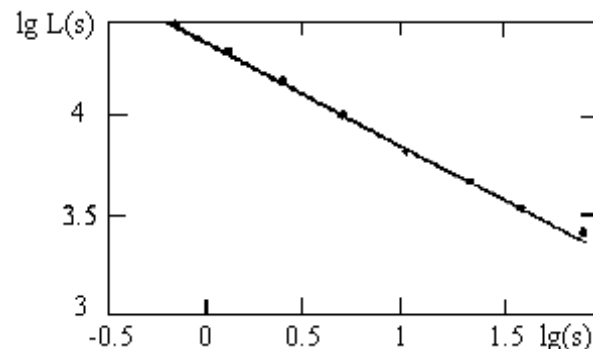


Рис. 3. Залежність довжини берегової лінії від довжини сторони s комірок нанесеної сітки

Для звичайної кривої $a = L_N$ (при достатньо малих s) і показник D дорівнює одиниці. Але для берегової лінії $D \approx 1,52$.

Отже, берегова лінія – фрактал з фрактальною розмірністю D .

Одна з основних властивостей фракталів – самоподібність, тобто їх вигляд не зазнає істотних змін при розгляданні під мікроскопом з будь-яким збільшенням. У найпростішому випадку невелика частина фракталу має інформацію про весь фрактал.

Розрізняють геометричні, регулярні фрактали (множина Кантора, фігура Кох, трикутник і ковдра Серпинського та ін.) і натуральні, природні фрактали (колоїдні агрегати, хмари, полімери, пористі середовища, дендрити, тріщини, поверхні тріщин твердих тіл тощо).

Природні фрактальні структури не є строго самоподібними, вони статистично самоподібні (самоафінні) об'єкти. Різниця цих понять у тому, що для самоафінних об'єктів коефіцієнти подібності відрізняються за різним вимірюванням. Фрактальна розмірність для самоафінних структур не визначається точно, а оцінюється за непрямими обчисленнями.

Результати експериментальних досліджень

Ураховуючи доведену фрактальність смуг ковзання в монокристалах [8], а також візуальні ознаки деформаційного рельєфу поверхні плакованого шару, що дають підстави для припущення про його фрактальність, доцільним є перевірка відповідності поверхневих дефектних структур, які розглядаються, критеріям фрактальних об'єктів.

Фрактальність деформаційного рельєфу дозволила б використати спектр підходів до визначення фрактальної розмірності [7; 8] і застосувати їх для аналізу і моніторингу деформаційного рельєфу в процесі втоми.

Поєднання методу кількісної оцінки накопиченого пошкодження, що заснований на визначенні площі поверхні з ознаками пошкодження, і підходів фрактальної геометрії для врахування не тільки площі дефектних структур, але й їх форми, дозволить підвищити точність визначення залишкового ресурсу елементів авіаційних конструкцій, які виготовлені з плакованих алюмінієвих сплавів.

Розглянемо визначення фрактальної розмірності деформаційного рельєфу за методом "box-counting"[7].

На рис. 4 показано контрастне зображення деформаційного рельєфу поверхні плакованого шару алюмінієвого сплаву Д-16 АТ після 75 000 циклів навантаження при 100,0 МПа.

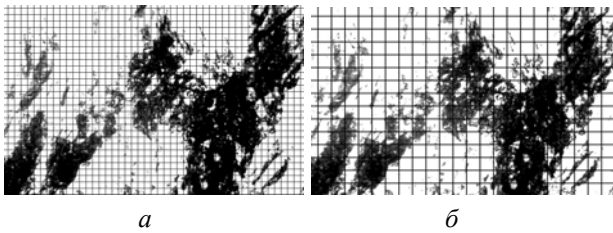


Рис. 4. Покриття деформаційної структури масштабною сіткою з розміром комірок 14 пт (а), 29 пт (б)

Створимо сітку комірок і накладемо її на зображення деформаційного рельєфу. Розмір комірок s дорівнює 5, 8, 11, 14 пт (рис. 4, а), 17, 20, 23, 29 пт (рис. 4, б).

Результати підрахунків кількості комірок $N(s)$, що накривають контури кластерів деформаційного рельєфу, залежно від розміру комірок занесемо до таблиці.

Результати підрахунку кількості комірок

s , пт	$N(s)$	$\lg N(s)$	$1/s$	$\lg(1/s)$
5	962	2,98	0,2	-0,699
8	558	2,747	0,125	-0,903
11	471	2,673	0,09	-1,041
14	365	2,562	0,071	-1,146
17	254	2,405	0,059	-1,23
20	200	2,301	0,05	-1,301
23	191	2,281	0,043	-1,361
26	159	2,201	0,038	-1,415
29	120	2,079	0,034	-1,462

Графік залежності $\lg N(s)$ від $\lg 1/s$ (рис. 5) дозволяє визначити фрактальну розмірність границь кластерів деформаційного рельєфу.

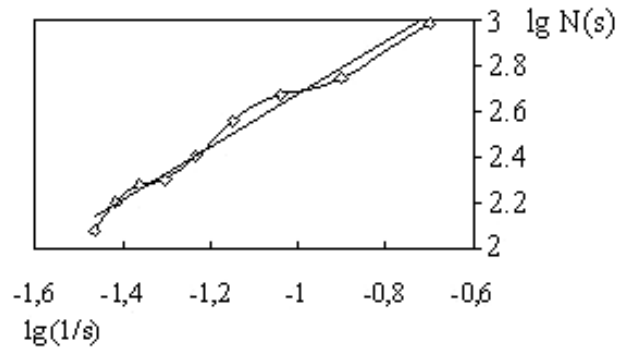


Рис. 5. Залежність кількості комірок, що покривають контури кластерів деформаційного рельєфу, від величини, оберненої розміру сторони комірки

Експериментальні дані можуть бути апроксимовані рівнянням

$$y = 1,1423x + 3,8107. \quad (1)$$

Це означає, що для поточного стану поверхні і відповідного накопиченого пошкодження фрактальна розмірність

$$D = 1,14.$$

При цьому досить високе значення квадрату коефіцієнта кореляції

$$R^2 = 0,9805$$

при застосуванні рівняння (1) вказує на обґрунтованість припущення щодо фрактальності зазначеної структури.

Наведений метод можна застосувати не тільки для визначення фрактальної розмірності границь кластерів деформаційного рельєфу, але і для підрахунку його площі при різних розмірах комірок. Для кола, квадрата, рівносторонніх трикутників та інших багатокутників відношення периметра до квадратного кореня їх площі не залежить від розміру багатокутника.

У праці [7] це було враховано при дослідженні фрактальної розмірності хмар і деяких інших природних об'єктів.

Отже, співвідношення площі й периметра характеризує форму геометричних об'єктів, і тоді може бути доцільним визначення відповідної фрактальної розмірності для структур, які формуються на поверхні металів у результаті дії циклічних напружень.

Ураховуючи необхідність аналізу динаміки зміни форми кластерів деформаційного рельєфу, здійснено оцінювання їх фрактальної розмірності після різних циклічних напрацювань.

На рис. 6 показано графік, що визначає фрактальність деформаційного рельєфу за результатами вимірювання контурів кластерів, а на рис. 7 – результати визначення фрактальної розмірності за співвідношенням площі і периметра.

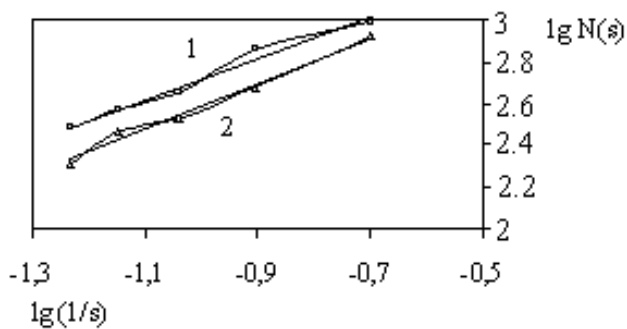


Рис. 6. Фрактальна розмірність контурів кластерів:
1 – $N=75000$ ($y=1,13x+3,86$); 2 – $N=164000$ ($y=1,09x+3,68$)

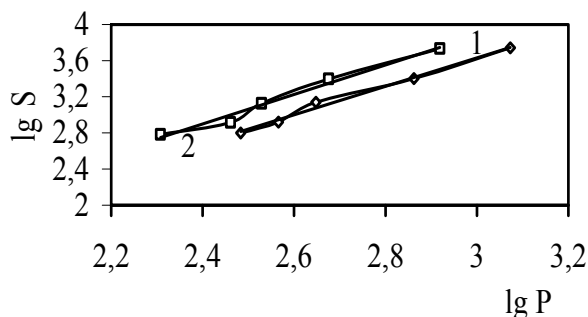


Рис. 7. Фрактальна розмірність співвідношення площі і периметра кластерів:
1 – $N=75000$ ($y=1,57x-1,1$); 2 – $N=164000$ ($y=1,63x-1,02$)

Вимірювання проведено при кількості циклів навантаження:

$N=75\ 000$; $N=164\ 000$.

В усіх випадках встановлена лінійність залежностей, що вказує на фрактальність структур. Крім того, фрактальна розмірність залежна від кількості циклів навантаження.

Висновки

1. Для аналізу структур, що формуються внаслідок дії циклічного навантаження на поверхні плакованого шару конструкційних алюмінієвих сплавів, можуть бути застосовані методи фрактальної геометрії.

2. Фрактальна розмірність деформаційного рельєфу залежить від кількості циклів навантаження, що визначає доцільність відповідного моніторингу при виконанні кількісної оцінки накопиченого втомного пошкодження.

Література

1. Карускевич М.В., Карускевич О.М. Мониторинг деградации прочности авиационных конструкций с помощью монокристаллических индикаторов // Пробл. системного подхода в экономике: Сб. – К.: КМУГА, 2000. – С. 96–101.
2. Мониторинг утоми конструкційних алюмінієвих сплавів / С.Р. Ігнатович, М.В. Карускевич, О.М. Карускевич та ін. // Вісн. НАУ. – 2004. – №1. – С. 88–92.
3. Карускевич О.М., Ігнатович С.Р., Карускевич М.В., Пантелеєв В.М. Диагностика усталости плакированных алюминиевых сплавов // Вестн. НТТУ «КПИ». Машиностроение. – 2002. – №43. – С. 53–55.
4. Карускевич О.М., Ігнатович С.Р., Карускевич М.В. Эволюция поврежденности сплава Д-16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины // Науч.-техн. журн. ХАУ им. Н.Е. Жуковского «ХАИ». Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – №4(12). – С. 29–32.
5. Карускевич О.М. Влияние уровня напряжений на развитие деформационного рельефа // Вестн. двигателестроения. – 2005. – №2. – С. 79–83.
6. Karuskevich O.M., Maslak T.P., Zhang Zhao Hui. Deformation roughness under cyclic and static loads // Proc. of NAU. – 2005. – №2(24). – P. 68–71.
7. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.
8. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 383 с.

Стаття надійшла до редакції 20.03.06.