

УДК 629.735.015.4: 539.431, 621.325:669.539.43

ЗАСТОСУВАННЯ ФРАКТАЛЬНОЇ ГЕОМЕТРІЇ В ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗУВАННЯ ЗАЛИШКОВОГО РЕСУРСУ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

М. В. КАРУСКЕВИЧ¹, І. М. ЖУРАВЕЛЬ², Т. П. МАСЛАК¹

¹ Національний авіаційний університет, Київ;

² Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАН України, Львів

Деформаційний рельєф поверхні плакованих алюмінієвих сплавів розглянуто як показник накопиченого втомного пошкодження. Показано можливість використання апарата фрактальної геометрії під час аналізу оптичних зображень деформаційного рельєфу. Досліджено низку методик обчислення фрактальних розмірностей. Запропоновано їх комплексне використання в задачах прогнозування залишкового ресурсу авіаційних конструкцій за станом деформаційного рельєфу.

Ключові слова: авіаційні конструкції, плакований алюмінієвий сплав, втомне пошкодження, залишковий ресурс, деформаційний рельєф, фрактальна розмірність.

Конструкція літака працює в умовах складного нерегулярного циклічного навантажування: під час польоту – порив вітру, дія надлишкового тиску в герметичній кабіні внаслідок маневрів літака та багатьох інших чинників; на землі – коливання, спричинені нерівностями поверхні злітно-посадкової смуги [1]. Тому для авіаційних конструкцій особливо актуальною є проблема втомного пошкодження.

Проте, моніторинг втомного пошкодження може забезпечити надійну та економічно ефективну експлуатацію авіаційної техніки [1] і доцільний як на стадії натурних випробувань нового літака на землі, так і під час його експлуатації.

На сьогодні створена значна кількість неруйнівних методів оцінки накопиченого втомного пошкодження, які можуть бути реалізовані шляхом безпосереднього контролю стану матеріалу конструкції, а також використання зразків-свідків втомного пошкодження.

Дослідження стану поверхні авіаційних конструкційних матеріалів за циклічного навантажування показали, що одним із показників накопиченого втомного пошкодження може бути деформаційний рельєф. Його можна спостерігати, зокрема, на плакованому алюмінієвому сплаві Д16АТ, який є найпоширенішим матеріалом у конструкції літака [2] та може бути використаний і для виготовлення зразків-свідків (сенсорів) втоми [3, 4].

Нижче наведено результати дослідження, спрямованого на обґрунтування кількісних параметрів деформаційного рельєфу, які можуть бути застосовані в задачах прогнозування залишкового ресурсу авіаційних конструкцій.

Матеріал і методики дослідження. Вивчали зразки-смуги з центральним отвором, виготовлені з плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ. Матеріал плакування – технічний алюміній АД1. Товщина плакувального шару 0,05 mm з кожної сторони. Розмір зразків 150×10×1 mm, а діаметр отвору – 1 mm. Концентратор напружень забезпечив локалізацію пошкодження і зручність моніторингу деформаційного рельєфу під час навантажування.

Контактна особа: І. М. ЖУРАВЕЛЬ, e-mail: zuravel@ipm.lviv.ua

Зразки навантажувались консольним згином. Максимальне напруження циклу навантажування в зоні концентратора $\sigma_{\max} = 147$ МПа, коефіцієнт асиметрії $R = 0$.

Для моніторингу деформаційного рельєфу використовували оптичний металографічний мікроскоп зі збільшенням $\times 150 \dots 400$.

Доведено [2, 5, 6], що для кількісної оцінки накопиченого втомного пошкодження можна використовувати параметр пошкодження D , який визначають поблизу концентратора напружень в зоні оптичного контролю. Обчислюють величину D як відношення площі поверхні з ознаками рельєфу до загальної площі поверхні на ділянці, розмір якої, визначений мікроскопом, становить $0,3 \dots 0,5$ mm.

Параметр пошкодження характеризує насиченість рельєфу, проте не може описати форму його кластерів, яка змінюється під час навантажування. Однією з причин еволюції форми кластерів рельєфу є їх коалесценція, що може визначати досягнення певної стадії пошкодження.

Самоорганізована природа формування і розвитку деформаційного рельєфу дає підстави вважати його природним фракталом і застосовувати для його кількісної оцінки апарат фрактальної геометрії, зокрема фрактальні розмірності.

Існує значна кількість методик визначення фрактальних розмірностей природних об'єктів [7]. Вони базуються на виокремленні пошкоджених і непошкоджених ділянок поверхні. Для цього обирають зображення з достатнім рівнем контрастності, яке через застосування порогових методів розділяють на ділянки чорного кольору, які приймають ділянками з ознаками деформації, і ділянки білого кольору, які вважають непошкодженими. Розроблена програма [8] дає змогу виділяти кластери деформаційного рельєфу та накладати сітку комірок на їх периметр та площу. Залежність кількості комірок, які покривають площу чи контури кластерів рельєфу, від їх розмірів є вихідними даними для визначення фрактальної розмірності клітинним методом [9]. Такий алгоритм дає можливість обчислювати фрактальні розмірності насиченості поверхні D_s , контурів кластерів D_p і відношення периметра кластерів деформаційного рельєфу до їх площі. Основні етапи визначення фрактальних розмірностей деформаційного рельєфу клітинним методом для зразка з напрацюванням рівним 530000 cycles, що відповідає 33% від загального напрацювання, показано на рис. 1.

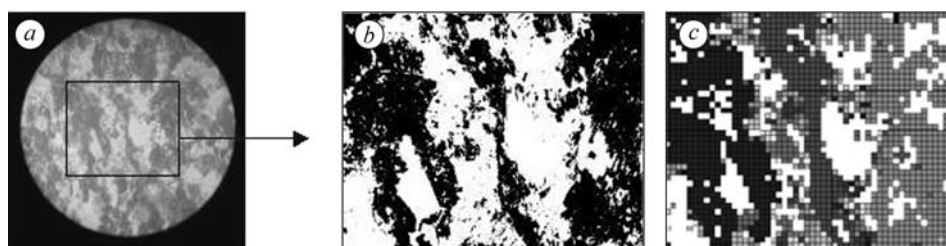


Рис. 1. Визначення фрактальної розмірності деформаційного рельєфу клітинним методом: *a* – виділення ділянки; *b* – монохромне її зображення; *c* – нанесення сітки комірок.

Fig. 1. Determination of fractal dimension of the deformation relief by the box-counting method: *a* – allocation of land deformation relief; *b* – its monochrome image; *c* – application of grid boxes.

Фрактальну розмірність деформаційного рельєфу можна визначати також і за допомогою методу крапок [10], який припускає первісну дискретизацію вхідного зображення матрицею комірок. При цьому підраховують імовірності попадання $P(m, L)$ m комірок в клітинку зі стороною L , у центрі якої знаходиться комірка, що належить фрактальній фігурі, де $m = 1 : L^2$.

Оцінку площі фрактальної фігури визначають за формулою

$$N(L) \geq M \sum_{m=1}^{L^2} \frac{P(m, L)}{m},$$

де M – загальна кількість комірок, що належать фрактальній фігурі. Далі обчислюємо значення фрактальної розмірності як тангенс кута нахилу прямої, яка апроксимує результати оцінки площі фрактальної фігури для різних значень кроку вимірювання.

Обидва розглянуті підходи передбачають визначення фрактальних розмірностей за монохромними зображеннями. Їх недолік – суб’єктивний фактор, а саме: налаштування оператором контрастності для виділення кластерів деформаційного рельєфу, а також спосіб перетворення напівтонового зображення у монохромне.

Метод визначення фрактальної розмірності на основі тривимірного подання зображення [11] дає можливість уникати проблем порогової обробки оптичних зображень поверхні для виділення кластерів деформаційного рельєфу. Тут

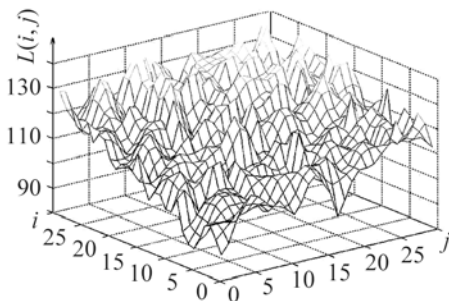


Рис. 2. Поверхня, утворена значеннями інтенсивності напівтонового зображення деформаційного рельєфу.

Fig. 2. Gray-scale image intensity of the surface deformation relief.

вхідними даними для визначення фрактальної розмірності будуть безпосередньо напівтонові зображення рельєфу. Цей підхід використовує відношення площі локального околу до його сторін. Особливість полягає в тому, що за вхідне використовують напівтонове зображення і під площею розуміють площу поверхні, утвореної значеннями інтенсивностей елементів локального околу (рис. 2). Тут показано тривимірне подання частини напівтонового зображення, де координатою (i, j) є рівень інтенсивності.

Розглянутий підхід не забезпечує потрібної чутливості до невеликих змін площі пошкоджених ділянок, тому за-

пропоновано інший для обчислення фрактальної розмірності таких зображень. Його суть така. У відомому клітинному методі для покриття фрактальної фігури використовували різну кількість клітин залежно від розміру її сторони. Аналогічним способом створену об’ємну фігуру покриваємо кубиками. Зрозуміло, що менша сторона ребра куба, то більше кубиків буде потрібно для покриття фігури, і навпаки. Таким чином, можна отримати залежності між розміром ребра куба та їх кількістю, необхідною для покриття об’ємної фігури. Отримані залежності подаємо в логарифмічних координатах і апроксимуємо прямою, тангенс кута нахилу якої визначає фрактальну розмірність цього об’єкта. Цей підхід був використаний як один з методів обчислення фрактальних розмірностей зображень деформаційного рельєфу.

Результати та їх обговорення. Подано (рис. 3) результати дослідження зміни обраних параметрів деформаційного рельєфу залежно від кількості циклів навантаження N_i до зародження тріщини в околі концентратора. Загальним для всіх отриманих залежностей є їх монотонний характер. Це означає, що всі вони можуть бути застосовані для моніторингу втомного пошкодження.

Еволюція параметра пошкодження D (рис. 3а), як показали численні дослідження [12], відображає зростання кількості зерен, залучених до формування рельєфу і загальної площі поверхні з деформаційним рельєфом.

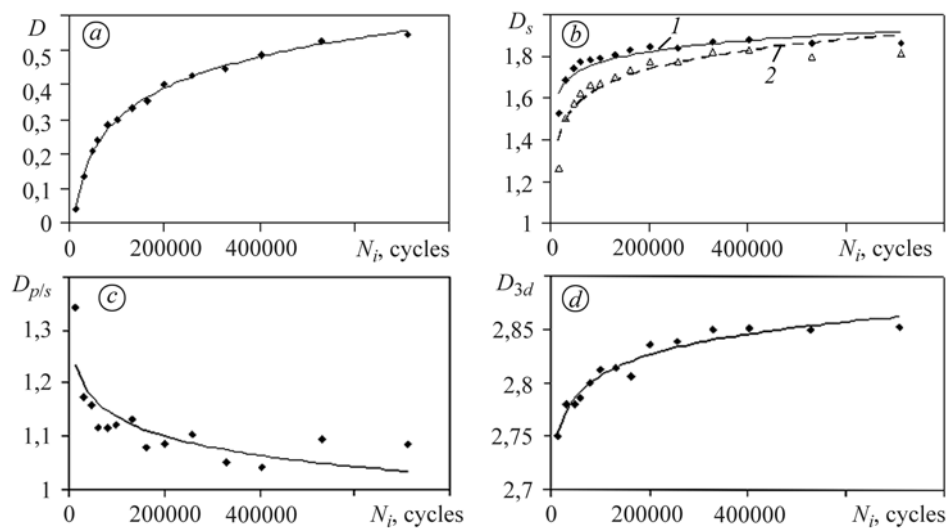


Рис. 3. Еволюція кількісних параметрів та фрактальних розмірностей деформаційного рельєфу: *a* – параметр пошкодження; *b* – фрактальна розмірність, визначена методами клітинок (1) та клітинок і крапок (2); *c* – за відношенням периметра кластерів деформаційного рельєфу до їх площі; *d* – на основі тривимірного подання оптичного зображення.

Fig. 3. Evolution of quantitative parameters and fractal dimensions of the deformation relief: *a* – damage parameter; *b* – fractal dimensions, determined by the box-counting (1), box and points (2) methods; *c* – the ratio of the perimeter of the clusters of strain relief to their area; *d* – on the basis of three-dimensional representation, of the optical image.

Зміни фрактальних розмірностей D_s (рис. 3b), визначених методами клітинок та клітинок і крапок, повторюють характер еволюції параметра пошкодження D , відображаючи зростання наповненості площі поверхні ознаками рельєфу.

Еволюція фрактальної розмірності $D_{p/s}$ (рис. 3c), визначеної за відношенням периметра кластерів деформаційного рельєфу до їх площі, характеризується швидким зменшенням значень на початковій стадії пошкодження і подальшою стабілізацією. Еволюція розмірності $D_{p/s}$ відображає два процеси: зростання кількості кластерів деформаційного рельєфу і їх злиття.

Еволюція фрактальної розмірності D_{3d} (рис. 3d), обчисленої на основі тривимірного подання оптичного зображення, повторює загальний характер зміни параметра пошкодження D і фрактальної розмірності D_s .

Розмірності, які визначають заповнення площини, знаходяться в діапазоні від 1,0 до 2,0, а обчислена з урахуванням інтенсивності напівтонового зображення рельєфу – між 2,0 і 3,0.

Таким чином, фрактальні розмірності деформаційного рельєфу можуть бути обчислені за різними методиками. Вибір найпридатнішої для моніторингу втомного фрактальної розмірності повинен базуватися на порівняльному аналізі моделей прогнозування залишкового ресурсу з визначенням кореляції між кількістю циклів навантаження і значенням певної фрактальної розмірності. Зважаючи на те, що фрактальні розмірності, визначені за різними методиками, можуть відображати різні складові формування і розвитку деформаційного рельєфу, доцільним є їх комплексне застосування в множинних регресійних моделях накопичення втомного пошкодження і прогнозування залишкового ресурсу.

ВИСНОВКИ

Моніторинг втомного пошкодження плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ може бути проведений шляхом оптичного контролю геометричних параметрів деформаційного рельєфу, який формується і розвивається внаслідок дії циклічного навантажування. Деформаційний рельєф поверхні є природним фракталом, що визначає можливість застосування апарата фрактальної геометрії для його кількісної оцінки.

РЕЗЮМЕ. Деформационный рельеф поверхности плакированных алюминиевых сплавов рассмотрено как показатель накопленного усталостного повреждения. Показана возможность использования аппарата фрактальной геометрии при анализе оптических изображений деформационного рельефа. Исследовано ряд методик вычисления фрактальных размерностей. Предложено их комплексное использование в задачах прогнозирования остаточного ресурса авиационных конструкций по состоянию деформационного рельефа.

SUMMARY. Deformation relief of the clad aluminium alloy surface is considered as an indication of accumulated fatigue damage. The possibility of using apparatus of fractal geometry in the analysis of optical images of strain relief is shown. A comprehensive use of fractal dimensions of strain relief in the prediction of residual life of aircraft structures by the state of deformation relief is proposed.

1. Гудков А. И., Лешаков П. С. Внешние нагрузки и прочность летательных аппаратов. – М.: Машиностроение, 1968. – 469 с.
2. Деклараци́нный патент на корисну модель № 3470. Спосіб визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за станом деформаційного рельєфу поверхні плакуючого шару / С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, О. М. Карускевич. – Опубл. 15.11.2004, Бюл. № 11.
3. Карускевич М. В., Карускевич О. М. Мониторинг деградации прочности авиационных конструкций с помощью монокристаллических индикаторов // Проблемы системного подхода в экономике. – 2000. – № 4. – С. 96–101.
4. Структурна пошкоджувальність і руйнування зразків-свідків втомного пошкодження / М. В. Карускевич, Е. Ю. Корчук, Т. П. Маслак та ін. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2008. – № 9 (56). – С. 110–114.
5. Диагностика усталости плакированных алюминиевых сплавов / О. М. Карускевич, С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич и др. // Вестник НТТУ КПИ. Машиностроение. – 2002. – № 43. – С. 53–55.
6. Карускевич О. М., Ігнатович С. Р., Карускевич М. В. Эволюция поврежденности сплава Д16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – № 4 (12). – С. 29–32.
7. Большаков В. И., Волчук В. Н., Дубров Ю. И. Фракталы в материаловедении: Учебник для студ. высш. техн. уч. заведений / Под ред. д.т.н., проф. В. И. Большакова. – Днепрпетровск: ПГАСА, 2005. – 253 с.
8. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М. В. Карускевич, Е. Ю. Корчук, Т. П. Маслак и др. // Пробл. прочности. – 2008. – № 6. – С.128–135.
9. Федер Е. Фракталы / Пер. с англ. Ю. А. Данилова, А. Шкурова. – М.: Мир, 1991. – 261 с.
10. Патент України 51439А. Спосіб визначення фрактальної розмірності зображень / В. І. Большаков, Ю. І. Дубров, Ф. В. Криулін, В. М. Волчук. – Опубл. 02.02.02.
11. Журавель І. М., Воробель Р. А. Обчислення фрактальних розмірностей з використанням поверхневого інтегралу // Відбір і обробка інформації. – 2007. – Вип. 26. – С. 95–98.
12. Карускевич О. М. Влияние уровня напряжений на развитие деформационного рельефа // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 79–82.

Одержано 04.04.2011