

УДК 620.179.1

Т.П. Маслак, асп.

РЕГРЕСІЙНІ МОДЕЛІ ЕВОЛЮЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ ПІД ЧАС ЦИКЛІЧНОГО НАВАНТАЖУВАННЯ

Розглянуто еволюцію деформаційного рельєфу, який формується на поверхні плакувального шару конструкційних алюмінієвих сплавів у широкому діапазоні умов циклічного навантажування. Визначено ряд параметрів деформаційного рельєфу. Отримано регресійні моделі еволюції параметрів стану поверхні. Показано, що застосування фрактальної розмірності кластерів поверхневих структур суттєво підвищує точність оцінювання накопиченого втомного пошкодження.

The evolution of deformation relief, which is formed on the surface of the alclad aluminum alloys under wide range of cyclic loading, is represented. Regression models of the state surface parameters evolution have been obtained. It is shown, that the application of the surface pattern clusters fractal dimension essentially increases the accuracy of accumulated fatigue damage estimation.

Постановка проблеми

Стохастична природа втоми металів, дія факторів, які не можуть бути враховані в разі використання аналітичних моделей, обумовлюють необхідність розроблення і застосування інструментальних методів визначення накопиченого втомного пошкодження, прогнозування місць і часу виникнення втомних тріщин, довговічності деталей і конструкцій у цілому.

Результати досліджень процесів втоми, які проводяться в Національному авіаційному університеті останнім часом, показують, що рельєф, який формується на поверхні деяких металів у процесі їх циклічного навантажування і є деформаційною структурою мезомасштабного рівня, можна розглядати як кількісний показник накопиченого втомного пошкодження.

Уперше кількісний зв'язок між параметрами деформаційного рельєфу і кількістю циклів навантажування було встановлено під час дослідження монокристалічних сенсорів утомного пошкодження [1]. Як діагностичний параметр розглядалась щільність смуг ковзання.

Надалі під час дослідження процесу деформаційного пошкодження полікристалічного алюмінію, який утворює плакувальний шар конструкційних алюмінієвих сплавів, було запропоновано параметр пошкодження, який визначає щільність ознак деформаційного рельєфу на поверхні за циклічного навантажування [2–5].

Доведено, що застосування запропонованого параметра дозволяє прогнозувати залишковий ресурс елементів конструкцій, виготовлених з плакованих конструкційних алюмінієвих сплавів Д-16АТ, 2024 Т3, 7075 Т6.

У роботі [6] експериментально встановлено, що деформаційний рельєф має ознаки фрактальності, що відповідає синергетичній природі втоми металів [7]. При цьому фрактальна розмірність кластерів деформаційного рельєфу залежна від утомного пошкодження і тому може розглядатися як параметр, що дозволяє виконувати оцінювання накопиченого пошкодження і відповідної кількості циклів навантажування до досягнення критичного стану.

Мета поданого в роботі дослідження – оцінити можливість прогнозування залишкової довговічності елементів конструкцій, виготовлених із плакованих алюмінієвих сплавів за параметрами деформаційного рельєфу при режимах утомних випробувань, що моделюють широкий спектр експлуатаційних умов навантажування.

Методика експерименту

Для кількісного оцінювання деформаційного рельєфу, який формується у процесі циклічного навантажування на поверхні плакувального шару Д-16АТ було використано параметр пошкодження D , фрактальні розмірності кластерів деформаційного рельєфу.

Фрактальні розмірності деформаційного рельєфу, який формується на поверхні плакувального шару алюмінієвого сплаву Д-16АТ під час циклічного навантажування, було визначено за методом “box-counting” [8]. Для автоматизованих обчислень було розроблено спеціальне програмне забезпечення. Програма, вікна якої показано на рис. 1, дозволяє обробляти цифрові фотографії деформаційного рельєфу і визначати сім'ю параметрів деформаційного рельєфу. Програму створено на основі розробленого програмного забезпечення для обчислення параметра пошкодження D .

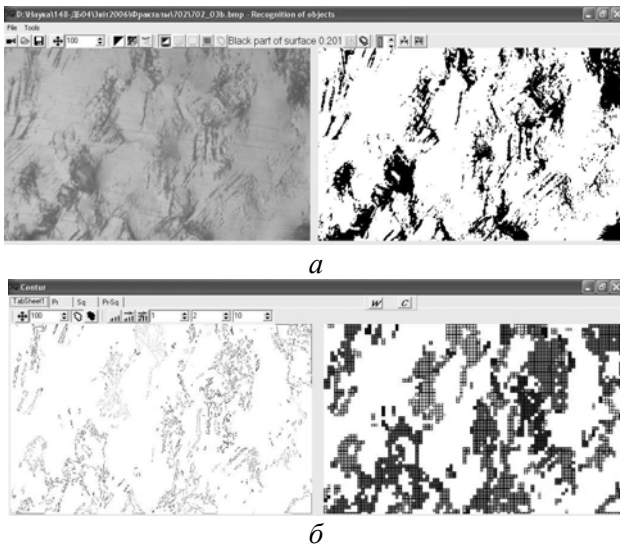


Рис. 1. Етапи обчислення параметрів деформаційного рельєфу за допомогою програми:

a – перетворення цифрового зображення поверхні в монохромне;

б – виділення окремих кластерів деформаційного рельєфу та їх контурів, накладання сітки комірок на контури кластерів або на їх поверхню

Окрім параметра пошкодження D , було визначено фрактальні розмірності D_s , D_p , $D_{p/s}$.

Фрактальна розмірність D_s вказує на заповненість поверхні кластерами деформаційного рельєфу, розмірність D_p – форму меж кластерів, а розмірність $D_{p/s}$, яка обчислюється за відношенням периметра контурів до площі, – характеристику форми кластерів у цілому. Дослідження проводили на зразках розміром $150 \times 10 \times 1,0$ мм в умовах консольного циклічного згину. Частота навантажування становила 25 Гц. На поверхні спостереження напруження змінювалось від нуля до максимального значення циклу розтягування.

Для локалізації пошкодження зразки мали отвір діаметром 1,0 мм. Безпосередньо біля отвору виконували оптичне спостереження за розвитком деформаційного рельєфу і фотографування цифровою камерою. Збільшення оптичного мікроскопу становило $\times 500$, розмір фотографій – 1000×500 пікселів. Інтервал контролю встановлювали залежно від інтенсивності формування і розвитку деформаційного рельєфу.

Результати експерименту

Моніторинг параметрів деформаційного рельєфу проводили за напружень:

$$\sigma_{\max} = 125,6 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\max} = 134,3 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\max} = 147,0 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\max} = 173,2 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{\max} = 235,0 \text{ МПа}.$$

Зазначений діапазон режимів навантажування містить як реальні напруження в елементах тонкостінних авіаційних конструкцій, так і ті, що використовуються під час проведення прискорених випробувань на втому.

На першому етапі проведено втомні випробування за $\sigma_{\max} = 173,2$ МПа в статистичному аспекті, що дало змогу визначити загальні закономірності процесу еволюції параметрів деформаційного рельєфу.

Ураховуючи практичне значення оцінки вичерпання ресурсу і прогнозування залишкової кількості циклів навантажування, отримані результати про зміну параметрів деформаційного рельєфу подано у вигляді залежностей

$$D = f(N \%), D_p = f(N \%), D_s = f(N \%), D_{p/s} = f(N \%),$$

де $N \%$ – відношення поточної кількості циклів навантажування до загальної кількості циклів навантажування до руйнування (рис.2).

Характер зміни досліджених параметрів віддзеркалює особливості процесів формування кластерів деформаційного рельєфу та їх коалесценції.

Так, збільшення кількості зерен, які мають візуальні ознаки мікропластичної деформації і відповідно площі поверхні з ознаками деформаційного рельєфу, призводить до зростання значень параметра пошкодження D і фрактальної розмірності D_s .

Заповнення поверхні зерен полікристала викликає вирівнювання ліній контурів кластерів, їх наближення до форми кристалітів і зменшення значень фрактальної розмірності D_p , яка вказує на хвилястість ліній.

Коалесценція кластерів зі збільшенням їх щільності визначає зменшення відношення довжини їх меж до площі і відповідні значення фрактальної розмірності $D_{p/s}$.

Загальним для всіх отриманих залежностей є наявність стадії насичення. Обумовлено це може бути особливістю кристалографічної текстури досліджених матеріалів і рівнем циклічних напружень.

У полікристалічному матеріалі за певних значень циклічних напружень і відповідних напруженнях зсуву в кристалографічних площинах кристалографічна орієнтація окремих зерен може бути такою, що процес зсуву не активується ні за якої кількості циклів навантажування.

Залучення в процес мікропластичної деформації всіх зерен, в яких є умови для активації зсуву, відповідає стадії насичення. Таким чином визначають межові значення досліджених параметрів деформаційного рельєфу.

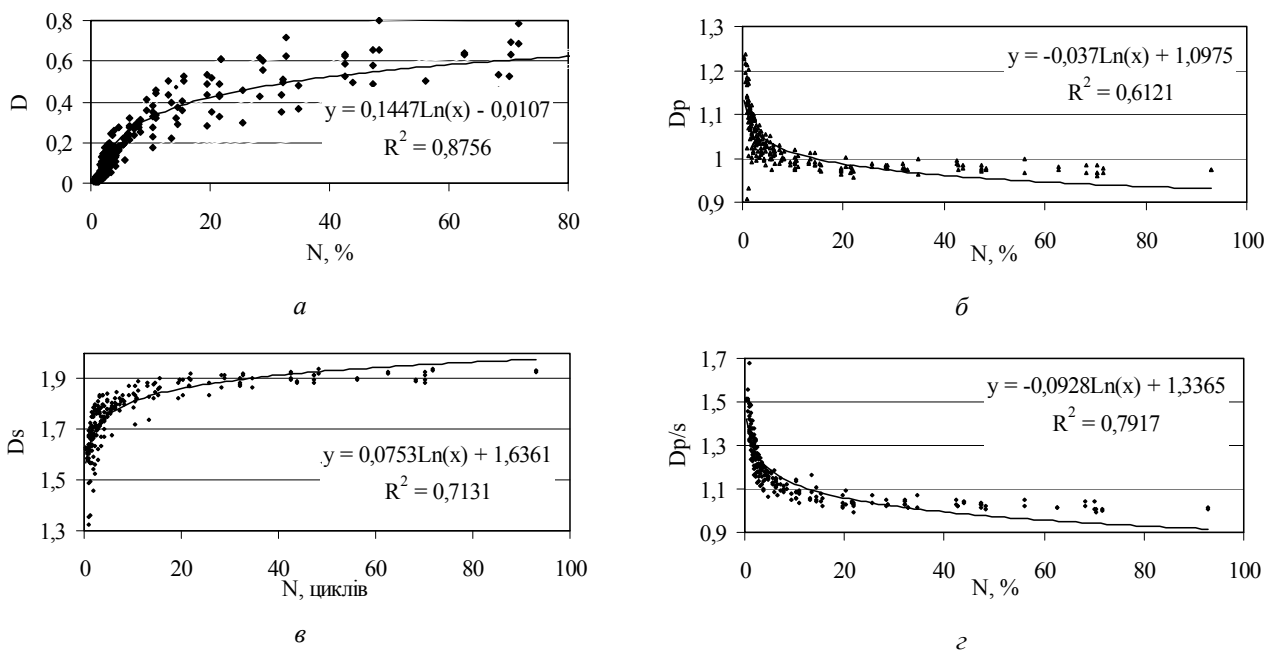


Рис. 2. Еволюція параметрів у процесі циклічного навантажування за $\sigma_{\max} = 173,2$ МПа:

- a – пошкодження D ;
- b – фрактальна розмірність D_P ;
- v – фрактальна розмірність D_S у відносних координатах;
- z – фрактальна розмірність $D_{P/S}$

Ураховуючи наявність кореляції між кількістю циклів навантажування і параметрами деформаційного рельєфу, розглянуто можливість застосування множинних кореляційних моделей для оцінювання вичерпання ресурсу.

Обробку експериментальних даних проведено із застосуванням програми Stat-Graph.

Розглянуто зв'язок залишкової кількості циклів навантажування з параметрами деформаційного рельєфу.

Установлено, що параметри рельєфу D , D_P , $D_{P/S}$ найбільш значущі у визначенні зв'язку з рівнем утомного пошкодження.

Результати регресійного і кореляційного аналізів експериментальних даних отриманих під час випробування з максимальним напруженням циклу 173,2 МПа, наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати регресійного і кореляційного аналізів даних

Залежність	Модель	R^2
$N_{\text{зал}} = f(D_{P/S})$	$N_{\text{зал}} = -17,901 + 90,0103 D_{P/S}$	37,0
$N_{\text{зал}} = f(D, D_P)$	$N_{\text{зал}} = 176,597 - 92,3604 D - 64,5619 D_P$	69,3
$N_{\text{зал}} = f(D, D_{P/S})$	$N_{\text{зал}} = 180,346 - 109,588 D - 56,6685 D_{P/S}$	71,4

Як видно з наведених результатів обчислення коефіцієнта кореляції R_1 , урахування лише фрактальної розмірності $D_{P/S}$ не забезпечує достатньої точності прогнозу.

У той же час застосування моделі $N_{\text{зал}} = 180,346 - 109,588D - 56,6685D_{P/S}$, яка базується на значеннях параметра пошкодження D і фрактальної розмірності $D_{P/S}$, забезпечує найбільше значення коефіцієнта кореляції. Визначений характер зміни параметрів деформаційного рельєфу було підтверджено результатами випробувань за напружень:

- $\sigma_{\max} = 125,6$ МПа;
- $\sigma_{\max} = 134,3$ МПа;
- $\sigma_{\max} = 147,0$ МПа;
- $\sigma_{\max} = 235,0$ МПа.

На рис. 3 зображено залежності параметрів деформаційного рельєфу від кількості циклів навантаження у відносних координатах, отриманих за різних значень максимальних напружень циклу навантажування:

$D_s = f(N \%)$ – залежність фрактальної розмірності за площею від кількості циклів у відносних координатах;

$D_{P/S} = f(N \%)$ – залежність фрактальної розмірності відношення периметра до площі від кількості циклів у відносних координатах;

$D_p = f(N \%)$ – залежність фрактальної розмірності за периметром від кількості циклів у відносних координатах;

$D = f(N \%)$ – залежність параметра пошкодження від кількості циклів у відносних координатах.

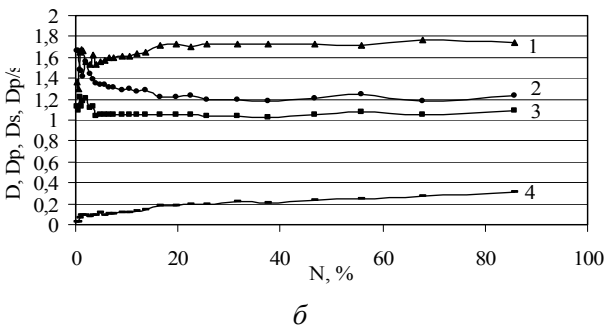
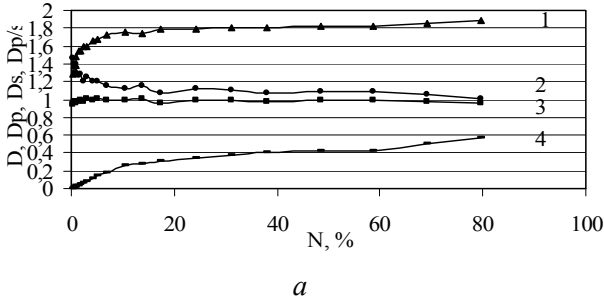


Рис. 3. Еволюція параметрів деформаційного рельєфу: а – $\sigma_{\max} = 125,6$ МПа; б – $\sigma_{\max} = 235,0$ МПа

У табл. 2 наведено отримані множинні регресійні моделі і відповідні значення квадратів коефіцієнтів кореляцій.

Таблиця 2

Регресійні множинні моделі вичерпання ресурсу

Напруження, МПа	Модель	R^2
125,6	$N_{\text{зал}} = 343,967 - 245,954D - 180,841 D_{p/s}$	78,2
134,3	$N_{\text{зал}} = 310,416 - 242,34 D - 154,923 D_{p/s}$	80,1
147,0	$N_{\text{зал}} = 204,804 - 166,885 D - 68,4547 D_{p/s}$	74,4
173,2	$N_{\text{зал}} = 180,346 - 109,588 D - 56,6685 D_{p/s}$	71,4
235,0	$N_{\text{зал}} = 228,252 - 385,173D - 69,0668 D_{p/s}$	92,3

Надалі для підвищення точності прогнозу залишкового ресурсу під час використання множинних кореляційних моделей, які враховують як насиченість поверхні ознаками деформаційного рельєфу (параметр пошкодження D), так і форму кластерів рельєфу (фрактальна розмірність $D_{p/s}$), заплановано проведення додаткових експериментів, в яких в умовах віднульового циклічного

розтягу будуть досліджені зразки сплаву Д-16АТ з центральним отвором діаметром 4,0 мм.

Такий концентратор напружень моделює отвір під заклепку реальної конструкції. Умови проведення випробувань, тобто можливості оптичного контролю стану поверхні безпосередньо в процесі циклічного навантажування, дозволять розділити стадії формування і розвитку втомної тріщини, що сприяє точності запропонованих регресійних моделей.

Висновки

Утомні випробування компактних зразків в умовах консольного згину з моніторингом стану поверхні плакувального шару дозволило встановити загальні закономірності еволюції параметрів деформаційного рельєфу. Про накопичене втомне пошкодження можна судити за насиченістю поверхні кластерами деформаційного рельєфу та їх формою. Оцінювання накопиченого втомного пошкодження за значенням параметра пошкодження D і фрактальною розмірністю $D_{p/s}$ можна виконувати в широкому діапазоні режимів циклічного навантажування.

Література

1. Карускевич О.М., Карускевич М.В. Мониторинг деградации прочности авиационных конструкций с помощью монокристаллических индикаторов // Проблемы системного подхода в экономике: сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 2000. – Вып. 4. – С. 96–100.
2. Карускевич О.М., Игнатович С.Р., Карускевич М.В., Пантелеев В.М. Диагностика усталости плакированных алюминиевых сплавов // Вестн. НТТУ "КПИ". Машиностроение. – 2002. – № 43. – С. 53–55.
3. Моніторинг утоми конструкційних алюмінієвих сплавів / О.М. Карускевич, С.Р. Ігнатович, М.В. Карускевич та ін. // Вісн. НАУ. – 2004. – № 1 (19). – С. 88–91.
4. Карускевич О.М., Игнатович С.Р., Карускевич М.В. Эволюция поврежденности сплава Д-16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины // Авиационно-космическая техника и технология. – Х.: Нац. аэрокосмический ун-т им. Н.Е. Жуковского "ХАИ". – 2004. – № 4 (12). – С. 29–32.
5. Карускевич О.М., Маслак Т.П., Карускевич М.В. Утома клеєварних і заклепкових з'єднань, оброблених антикорозійними захисними сполуками // Вісн. НАУ. – 2005. – № 1(23). – С. 97–100.
6. Карускевич М.В., Корчук О.Ю., Маслак Т.П., Чжан Чжао Хуей. Фрактальність деформаційного рельєфу полікристалічного алюмінію // Вісн. НАУ. – 2006. – № 2 (28). – С. 79–81.
7. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж. Синергетика и фракталы в материаловедении. – М.: Наука, 1994. – 383 с.
8. Федер Е. Фракталы. – М.: Мир, 1991. – 254 с.