

УДК 620.179.1 (045)

**ФОЛЬГОВІ СТРУКТУРНО-ЧУТЛИВИ СЕНСОРИ ВТОМИ МЕТАЛІВ***М. В. Карускевич*, д-р техн. наук, проф.

Національний авіаційний університет

mkaruskevich@hotmail.com

*Представлена концепція фольгових структурно-чутливих сенсорів втоми металів. В основі наведеного підходу — формування і розвиток деформаційного рельєфу поверхні циклічно деформованих металів. Розглянуто два види сенсорів, які відрізняються структурою і відповідною чутливістю до циклічного навантаження.*

**Ключові слова:** втома, фольгові сенсори, деформаційний рельєф.

*The concept of foil structurally sensitive indicators of fatigue is presented. The basis of introduced approach is the deformation relief initiation and development on the metal surface under cyclic loading. It has been considered two types of indicators differing appropriate sensitivity to cyclic loading.*

**Keywords:** fatigue, foil indicator, deformation relief.

**Вступ**

Незважаючи на розвиток аналітичних методів оцінки і прогнозу технічного стану авіаційних конструкцій і систем, інструментальний контроль залишається найбільш достовірним.

Удосконалення технологій інструментального контролю призвело до формування нового напрямку, який отримав назву *Structural Health monitoring*, що можна визначити як «Моніторинг технічного стану». Значне місце в таких системах займають засоби моніторингу нагромадженого втоми пошкодження і оцінки відповідного відпрацювання ресурсу.

Спроби інструментальної оцінки нагромадженого втоми пошкодження здійснювалися протягом багатьох років.

Відомі різноманітні розробки, які відображали технологічні можливості свого часу, проте, враховуючи різноманітність конструкцій, що працюють в умовах циклічного навантаження, конструкційних матеріалів, умов і режимів навантаження, можна стверджувати, що пошук нових підходів і технічних рішень при розробці сенсорів втоми, буде продовжений.

Такий спектр можливих способів моніторингу втоми відповідає і вимогам концепції *Structural Health monitoring*, яка передбачає встановлення на конструкціях систем сенсорів в усіх зонах, відповідальних за тривалу безпечну експлуатацію.

Моніторинг втоми є надзвичайно актуальним для авіації, проте, розглянутий в статті підхід може бути адаптований для застосування в інженерних конструкціях різноманітного призначення.

**Застосування сенсорів втоми**

Оцінку нагромадженого втоми пошкодження виконують як безпосереднім контролем стану матеріалу конструкції, так і за станом зразків-свідків (сенсорів втоми).

Застосування сенсорів втоми має ряд переваг, серед яких слід виділити можливість керування їх чутливістю відповідно до особливостей процесу пошкоджуваності елементів конструкції, що інспектується.

Процес втоми металів супроводжується зміною їх властивостей на мікро-, мезо- та макромасштабних рівнях, що дозволяє застосувати ряд фізичних методів для кількісної оцінки пошкодження сенсорів і відповідного відпрацювання ресурсу конструкції.

У праці [1] розглянуто найбільш ефективні розробки, які знайшли застосування на практиці. Слід відмітити, що деякі достатньо чутливі методи не можуть бути використані для моніторингу втоми пошкодження в зв'язку з немонотонністю зміни параметрів, які реєструються [2].

**Еволюція стану поверхні металів як показник накопиченого втоми пошкодження**

На поверхні багатьох чистих металів і деяких сплавів в результаті дії циклічних навантажень формується і розвивається деформаційний рельєф, який являє собою сукупність екструзій, інтрузій, смуг ковзання.

Численні дослідження деформаційного рельєфу, який формується на поверхні алюмінію, показали [3–8], що його зміна може бути оцінена якісно і кількісно застосуванням комп'ютеризованого оптичного методу неруйнівного контролю.

Явище формування і розвитку деформаційного рельєфу лежить в основі застосування фольгових сенсорів втоми, які можуть бути виготовлені з полікристалічного і квазімонокристалічного алюмінію. Представлений розробці передувало створення сенсорів [3], виготовлених з монокристалічного алюмінію, вирощених відповідно до методу Бріджмена.

Складність процесу виготовлення і, як наслідок, висока вартість таких сенсорів, призвели до пошуку альтернативних варіантів. Матеріалом, який дозволяє виготовити структурно-чутливий

сенсор втоми, може бути фольга технічного алюмінію АД-1 [9], основні характеристики якого наведені в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву АД-1, % [9]

Fe	Si	Mn	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Домішки
До 0,3	До 0,3	До 0,025	До 0,15	Min 99,3	До 0,05	До 0,05	До 0,1	Усього 0,7

Таблиця 2

Механічні властивості сплаву АД-1 при  $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]

Стан	Границя міцності, МПа	Границя пропорційності, МПа	Відносне подовження під час руйнування, %	Відносне звуження під час руйнування, %
Після відпалювання	70	30	36	89

Товщина фольги сплаву АД-1 до обробки становила 0,2 мм. Розмір сенсору після підготовки поверхні  $20,0 \times 10,0 \times 0,15$  мм. Зменшення товщини з 0,2 мм у заготовці до 0,15 мм в сенсорі зумовлено його поліруванням.

Необхідна для оптичного аналізу деформаційного рельєфу якість поверхні сенсору отримується завдяки послідовному застосуванню механічного полірування і електролітичного полірування. Механічне полірування виконується ручним способом з використанням алмазної пасти.

Електролітичне полірування виконується в електроліті, який містить: 50 %  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , 39 %  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 3 %  $\text{CrO}_2$ , 8 %  $\text{H}_2\text{O}$ . Щільність струму 15–20 А/дм<sup>2</sup>; температура електроліту при поліруванні 75–85 °С.

Кріплення фольгових сенсорів виконується багатокомпонентним клеєм PASCO FIX на основі етилового ефіру сіанакрилової кислоти.

Досвід застосування клеїв на основі ціакрину для тензометрирування при проведенні випробувань літаків свідчить про можливість використання клею в температурному діапазоні, що відповідає умовам роботи авіаційних конструкцій.

У проведеному циклі випробувань фольгові сенсори кріпилися на плоскому зразку сплаву Д16АТ, який випробувався при максимальному напруженні від нульового циклу навантаження  $\sigma_{\text{max}} = 180,0$  МПа з частотою навантаження 11,0 Гц. Випробування проводилися на стандартній гідропульсаційній машині МУП-20.

Спостереження за станом поверхні проводилось за допомогою оптичного металографічного мікроскопі ММР-4 з фіксацією цифрових зображень збільшенням  $350^{\times}$ .

Розглянуто два види фольгових сенсорів: а) полікристалічні сенсори втоми; б) квазімонокристалічні сенсори втоми.

### Полікристалічні сенсори втоми

Розмір зерна фольги сплаву АД-1 в стані постачання (без термообробки) не перевищує 0,1 мм.

Термообробка з метою зняття внутрішніх напружень в заготовках сенсорів при температурі 550 °С протягом 2 год призвела до зростання середнього розміру зерна до 0,3 мм.

Сенсори з такою структурою розглядалися як полікристалічні.

На рис. 1 показано деформаційний рельєф поверхні сенсорів, виготовлених з зазначеного полікристалічного алюмінію.

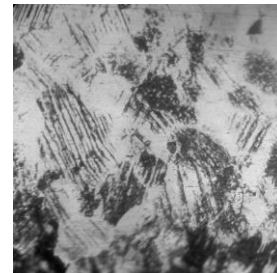


Рис. 1. Деформаційний рельєф поверхні полікристалічного фольгового структурно-чутливого сенсора втоми ( $N = 10000$  циклів навантаження)

Як видно з рис. 1 деформаційний рельєф поверхні полікристалічного алюмінію має нерегулярний характер, формування рельєфу залежить від кристалографічної орієнтації кристалітів, в деяких кристалітах рельєф відсутній навіть при значних циклічних напруженнях.

### Квазімонокристалічні сенсори втоми

Сенсори, в яких використанням методу критичної деформації та відпалювання досягався розмір зерна більше ніж 10,0 мм, можна вважати квазімонокристалічними, розмір зерен дозволяє розглядати кожне зерно як монокристал і засто-

сувати для їх аналізу рентгеноструктурний метод визначення кристалографічної орієнтації.

На рис. 2 показано деформаційний рельєф поверхні сенсорів, виготовлених з квазімонокристалічного алюмінію.

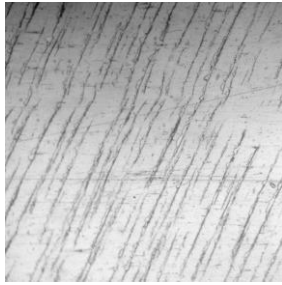


Рис. 2. Деформаційний рельєф поверхні квазімонокристалічного фольгового структурно-чутливого сенсору втоми ( $N = 10000$  циклів навантаження)

Деформаційний рельєф поверхні квазімонокристалів (рис. 2) має регулярний характер, насиченість рельєфу монотонно збільшується зі збільшенням кількості циклів навантаження.

Очевидно, що одним із факторів, що визначає чутливість таких сенсорів, є кристалографічна орієнтація.

### Діагностичні параметри

При дослідженні деформаційного рельєфу поверхні монокристалів алюмінію та полікристалічного алюмінієвого плакувального шару сплаву Д16АТ, було запропоновано діагностичні параметри, які дозволяють виконати кількісну оцінку накопиченого втомного пошкодження:

- а) щільність смуг ковзання [3];
- б) фрактальна розмірність деформаційного рельєфу  $D_{p/s}$  [4];
- в) параметр пошкодження  $D$ , який визначається за насиченістю деформаційного рельєфу [4].

Проведені експерименти показали, що параметр пошкодження  $D$ , який визначається як відношення площі поверхні з ознаками рельєфу до загальної площі спостереження, може бути застосований як для дрібнозернистих, так і для крупнозернистих структур. Додатковим параметром, що є характеристикою форми кластерів рельєфу, може бути фрактальна розмірність деформаційного рельєфу поверхні. Типова залежність насиченості деформаційного рельєфу поверхні (параметр пошкодження  $D$ ), від відносного напрацювання показана на рис. 3.

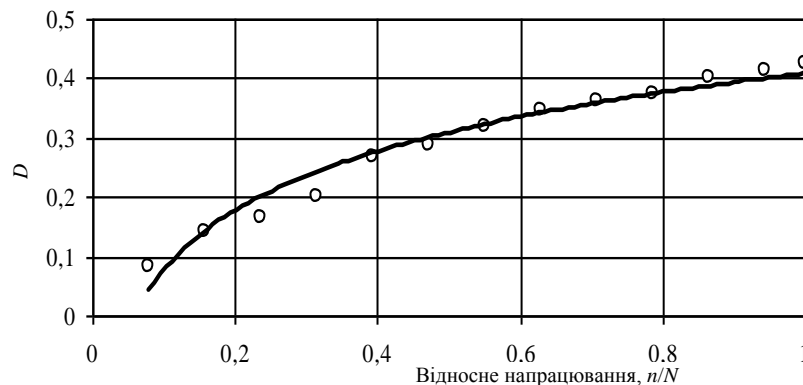


Рис. 3. Еволюція насиченості деформаційного рельєфу структурно-чутливого сенсору у процесі циклічного навантаження

Відносне напрацювання обчислюється як відношення кількості циклів навантаження  $n$ , при якій визначалося значення параметра пошкодження, до кількості циклів навантаження до появи втомної тріщини  $N$ .

Залежність отримана при випробуваннях полікристалічного (дрібнозернистого) сенсора.

Як видно з рис. 3, залежність параметру пошкодження  $D$  від кількості циклів навантаження є монотонною протягом усього періоду моніторингу, що підтверджує можливість використання обраного параметра як діагностичного.

Кореляційний і регресійний аналізи показали, що логарифмічна функція є найбільш придатною для опису зв'язку між параметром пошкодження  $D$  і відносною кількістю циклів навантаження.

Аналогічний висновок було зроблено і в результаті аналізу даних про пошкоджуваність квазімонокристалічних сенсорів.

Практичне застосування сенсорів потребує проведення тарировочних випробувань, які дозволять встановити зв'язок між характеристиками стану сенсора і станом елемента конструкції, на якому він встановлюється.

Орієнтаційна залежність втоми квазімонокристалів визначає одну з основних переваг відповідних структурно-чутливих сенсорів. Вибір кристалітів для виготовлення сенсорів дає змогу оптимізувати чутливість сенсора.

Ще однією можливістю керування чутливістю сенсорів є термічна обробка, яка впливає на пластичність металу.

## Висновки

Концепція фольгових сенсорів утомного пошкодження може бути реалізована шляхом використання сенсорів двох видів: а) полікристалічних сенсорів втоми; б) квазімонокристалічних сенсорів втоми.

Перевагою сенсорів першого виду є простота виготовлення. Другий вид сенсорів передбачає можливість керування їх чутливістю на основі орієнтаційної залежності втоми металів.

Адаптація розробленого інструментального способу контролю пошкодження для виконання моніторингу втоми різноманітних інженерних конструкцій потребує проведення додаткових досліджень. Алгоритм таких досліджень повинен містити: а) аналіз навантаженості об'єктів контролю; б) проведення лабораторних випробувань зразків конструктивних елементів з моніторингом параметрів деформаційного рельєфу встановлених на них сенсорів втоми; в) отримання кореляційних математичних моделей процесу, які пов'язують стан сенсорів з кількістю циклів навантаження до досягнення критичного стану елементів досліджуваних конструкцій.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Boller C. Ways and options for aircraft structural health management / C. Boller // *Smart Mater Struct.* — 2001, — №10. — P. 432–440.
2. Карускевич М. В. Вимоги до діагностичних параметрів при неруйнівному контролі втоми елементів авіаційних конструкцій / М. В. Карускевич, О. Ю. Корчук, Т. П. Маслак [та ін.] // *Вісник НАУ.* — 2011. — № 2. — С. 110–114.
3. Karuskevich M.V. Single-crystal as an indicator of fatigue damage *Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct.* / M. V. Karuskevich, A. I. Radchenko, E. E. Z asimchuk. — Vol. 15. — 1993. — № 12. — P. 1281–1283.
4. Оценка накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / [М. В. Карускевич, Е. Ю. Корчук, Т. П. Маслак, А. С. Якушенко] // *Проблемы прочности.* — 2008. — № 6 (396). — С. 128–135.
5. Karuskevich M. Extrusion/intrusion structures as quantitative indicators of accumulated fatigue damage / [М. Karuskevich, О. Karuskevich, Т. Maslak, S. Schepak] // *International Journal of Fatigue.* — 2012. — № 39. — P. 116–121.
6. Пат. 3470 Україна, МПК G 01 N 3/32. Спосіб визначення залишкового ресурсу елементів конструкцій за станом деформаційного рельєфу поверхні плакувального шару / С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, О. М. Карускевич; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. — № 2004031792; заявл. 11.03.04; опубл. 15.11.04, Бюл. № 11.
7. Пат. 29683 Україна, МПК G 01 N 3/32. Спосіб прогнозування залишкової довговічності елементів авіаційної конструкцій по насиченості і фрактальній розмірності деформаційного рельєфу / С. Р. Ігнатович, М. В. Карускевич, Т. П. Маслак, В. М. Пантелєєв, О. С. Якушенко; заявник та патентовласник Національний авіаційний університет. — № u 200709909; заявл. 04.09.07; опубл. 25.01.08, Бюл. № 2.
8. Структурно-чувствительный сенсор усталости авиационных конструкций / С. Р. Игнатович, М. В. Карускевич, Т. П. Маслак, Д. Н. Костенюк // *Вісник Тернопільського національного технічного університету.* — 2011. — Спецвипуск. Ч. 1. — С. 178–182.
9. ГОСТ 618-73 Фольга алюминиевая для технических целей. Технические условия.

Стаття надійшла до редакції 14.01.13.