

Ігнатович С. Деформаційний рельєф на поверхні сплаву Д16АТ як показник історії експлуатаційного навантажування авіаційних конструкцій / Ігнатович С., Юцкевич С., Дорошенко Є. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Том 16. — № 3. — С.57-62. — (механіка та матеріалознавство).

УДК 629.735.015.4:620.179.1(042.3)

**С. Ігнатович, докт. техн. наук; С. Юцкевич; Є. Дорошенко**

*Національний авіаційний університет*

## **ДЕФОРМАЦІЙНИЙ РЕЛЬЄФ НА ПОВЕРХНІ СПЛАВУ Д16АТ ЯК ПОКАЗНИК ІСТОРІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОГО НАВАНТАЖУВАННЯ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ**

*Резюме.* Формування деформаційного рельєфу (ДР) на поверхні алюмінієвого сплаву дає можливість розглядати його як індикатор історії експлуатаційного навантажування. В якості параметрів, які характеризують зміну ДР з напрацюванням, розглянуто параметри насиченості ДР, шорсткість поверхні і параметр пластичної деформації поверхні. Проведено порівняльний аналіз еволюції цих параметрів при регулярному і випадковому режимах навантажування.

*Ключові слова:* деформаційний рельєф, регулярне циклічне навантажування, випадкове циклічне навантажування, інтерференційна профілометрія.

**S. Ignatovich, S.Yutskevych, E. Doroshenko**

## **DEFORMATION RELIEF ON D16AT ALLOY SURFACE AS INDICATOR OF PROSPECTS OF OPERATIONAL LOADING HISTORY OF AIRCRAFT STRUCTURES**

*The summary.* Deformation relief formation on D16T alloy alclad surface allows to consider it as indicator of operational loading history. Results of the deformation relief parameters evolution versus operating time are represented by parameter of deformation relief saturation, parameter of a surface roughness and surface plastic deformation. The results obtained under regular and variable amplitude loading are compared.

*Key words:* deformation relief, constant amplitude cycle loading, variable amplitude cycle loading, interfere profilometry.

**Постановка проблеми.** Для авіаційної техніки проблема оцінювання зміни фізико-механічних властивостей матеріалу елементів конструкції є на сьогодні доволі актуальною. Це пов'язано, насамперед, з тим, що конструкція планера в експлуатації сприймає складний спектр випадкового навантажування. Крім того, спектр навантажувальних умов, який визначається умовами експлуатації конкретного екземпляра повітряного судна (ПС), може істотним чином відрізнятися від типового, властивого для всього парку ПС даного типу. Все це ускладнює розрахунки з визначення залишкового ресурсу конструкції планера. Тому для вирішення перерахованих проблем необхідно використовувати інформацію про поточний стан контрольованих елементів конструкції планера, що дозволить визначати залишкове напрацювання до граничного стану з урахуванням особливостей експлуатації конкретного ПС.

**Аналіз публікацій з проблеми.** Ідеологія функціонування системи збору інформації про історію експлуатаційного навантажування відображається в основних принципах роботи системи автоматичного контролю технічного стану ПС, яку запропонувала фірма Airbus – Structure Health Monitoring [1, 2]. За допомогою закріплених на конструкції ПС датчиків [3] стає можливим отримувати інформацію про поточний стан і навантаженість об'єкта контролю, а значить, прогнозувати час досягнення граничного стану контрольованого елемента конкретного екземпляра ПС.

Використання в авіації конструкційних сплавів з плакуючим шаром із чистого технічного алюмінію дозволяє розглядати зміну стану поверхні елемента конструкції при втомі як інформацію про історію навантажування і пошкодженості матеріалу без використання датчиків [4, 5]. Це пов'язано з тим, що при втомі металів відбувається формування й еволюція дислокаційних структур на різних масштабних рівнях [6]. Причому ці процеси інтенсифікуються в поверхневому шарі й утворюють деформаційний рельєф (ДР) [7], тим самим дозволяючи розглядати поверхню зі слідами ДР як індикатор накопичених пошкоджень. При кількісному оцінюванні ДР стає можливим діагностувати вичерпання несучої здатності конструкції.

**Мета роботи.** Розробити методику контролю ДР поверхні з використанням методу інтерференційної профілометрії та визначити особливості еволюції ДР при регулярному та випадковому циклічному навантажуванні.

Плоскі зразки зі сплаву Д16АТ випробувалися на сервогидравлічній установці BiSS Bi-00-202V при регулярному та при випадковому циклічному навантажуванні. У центральній частині зразка наносився концентратор напруження у вигляді отвору діаметром 4 мм, що дозволяло моделювати отвір під заклепку в обшивці літака.

Регулярне навантажування реалізовувалося за віднулевим циклом ( $0 \Leftrightarrow \sigma_{\max}$ ) при значеннях максимального напруження в циклі  $\sigma_{\max}$ : 150 МПа, 130 МПа, 100 МПа, 80 МПа та 60 МПа. Частота навантажування складала 12 Гц.

Випадкове навантажування виконувалося за стандартизованою програмою MiniTWIST [8], що імітує експлуатаційний спектр навантажування кореневої частини обшивки крила. Зразки навантажувалися при середньому значенні напруження спектра  $\sigma_m$ : 100 МПа, 90 МПа і 80 МПа. Швидкість навантажування складала 75 кН/с.

При виборі періодичності контролю стану поверхні зразків при випадковому навантажуванні приймалося наступне.

1. У якості параметра втомної довговічності використовувалося число польотів.
2. Навантаження, які рідко але незмінно зустрічаються в умовах експлуатації, групувалися в періодично відтворюваних «важких» польотах – польотах з інтенсивною турбулентністю, або реалізуються у формі періодично повторюваних разових (одиничних) навантажень, які прикладаються між польотами (наприклад, посадка літака). При цьому негативні значення навантажень спектра замінювалися нульовим значенням, що дозволяло запобігти втраті стійкості зразка при стисненні.
3. Програма випробувань MiniTWIST являє собою спектр навантажень, що складається з 40 000 польотів, розділених на 10 блоків по 4 000 польотів в кожному. Припускалося, що транспортний літак за період експлуатації у 40 000 польотів здійснює 10 польотів в умовах бовтанки з максимальною інтенсивністю.

З урахуванням цих припущень у якості періоду напрацювання при контролі стану поверхні було вибрано напрацювання  $N = 4\,000$  польотів, тобто один блок.

На зразках контролювалася зона поверхні біля концентратора. Ця зона у вигляді полірованої прямокутної площадки розмірами  $225 \times 170$  мкм розташовувалася уздовж центральної осі отвору на відстані 100 мкм від його краю. Рельєф поверхні визначався з використанням інтерференційного нанопрофілометра Micron-Alpha [9, 10] у режимі «мікроскоп» і «профілометр» (рис.1).

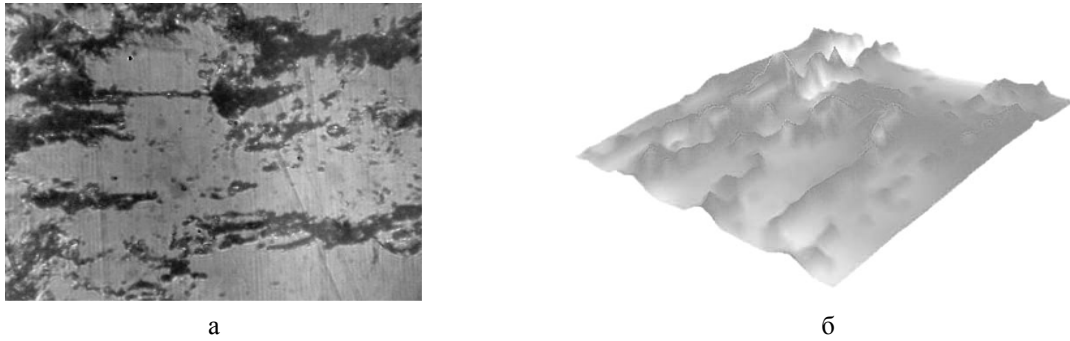


Рисунок 1. Цифрова фотографія ( $\times 500$ ) (а) і 3D зображення (б) ділянки поверхні зі слідами деформаційного рельєфу, що отримані при обробці даних сканування за допомогою приладу Micron-Alpha

Для характеристики стану поверхні використовувалися такі показники [11]:

1) параметр насиченості ДР ( $D$ ) [12], який визначається по цифрових фотознімках поверхні і визначається відношенням площі поверхні зі слідами мікропластичної деформації до величини досліджуваної площі;

2) параметр шорсткості поверхні ( $\Delta \bar{R}_a$ ), який визначається відхиленням приросту шорсткості  $\Delta R_a = R_a - R_{a0}$  відносно його початкового значення  $R_{a0}$  (до навантажування);

3) пластична деформація ( $\varepsilon_a$ ), яка визначається зміною площі поверхні  $\Delta A = A - A_0$  відносно початкового значення  $A_0$  (до навантажування).

**Результати експериментальних досліджень.** У ході досліджень еволюції насиченості ДР при регулярному та випадковому циклічному навантаженні було встановлено, що параметр  $D$  збільшується з числом циклів/польотів за степеневу залежністю

$$D = a \bar{N}^b, \quad (1)$$

де  $a$  і  $b$  – коефіцієнти;  $\bar{N}$  – відносне напрацювання, яке визначається відношенням напрацювання  $N$ , при якому проводилося вимірювання параметра  $D$ , до напрацювання  $N_{mp}$ , при якому утворюється тріщина довжиною 0,5 мм ( $\bar{N} = N / N_{mp}$ ).

У подвійних логарифмічних координатах ці залежності апроксимуються прямими лініями (рис. 2).

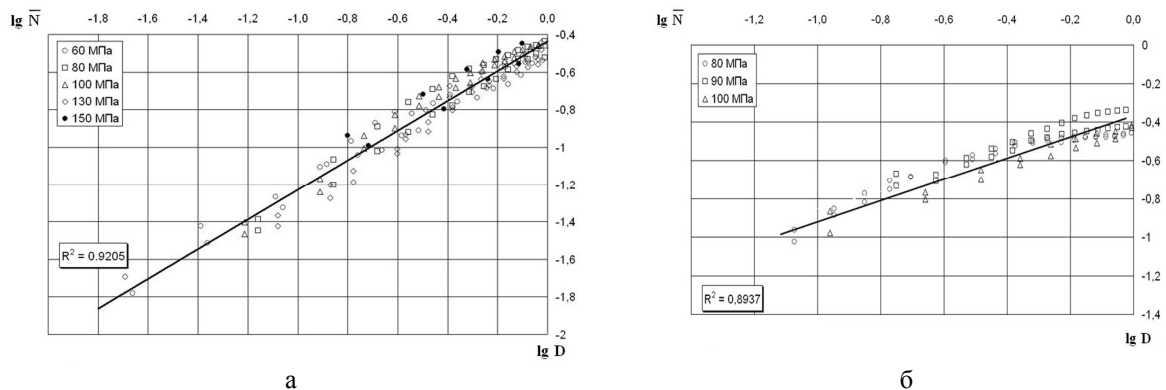


Рисунок 2. Зміна насиченості ДР від відносного напрацювання до утворення втомної тріщини довжиною 0,5 мм для різних значень напружень при регулярному (а) і випадковому (б) циклічному навантаженні

Були отримані регресійні залежності, які узагальнюють отримані результати:

- для регулярного навантажування

$$D = 0,3656 \bar{N}^{0,8}; \quad (2)$$

- для випадкового навантажування

$$D = 0,388 \bar{N}^{0,48}. \quad (3)$$

Встановлено, що коефіцієнти  $a$  і  $b$  рівняння (1) не залежать від рівня напруження і коливаються біля середніх значень:  $a = 0,366$  і  $b = 0,8$  для регулярного і  $a = 0,388$  та  $b = 0,48$  для випадкового навантажування. При цьому слід зазначити, що процес збільшення насиченості ДР затухає з числом циклів, причому для випадкового навантажування це загасання інтенсивніше. Іншою особливістю отриманих результатів для випадкового і регулярного режимів навантажування є досить близьке значення коефіцієнтів  $a$ . Це дозволяє зробити висновок, що при утворенні втомної тріщини ( $\bar{N} = 1$ ) не залежно від виду навантажування і рівня діючого напруження граничне значення параметра насиченості складає  $D^* \cong 0,36...0,39$ . При цьому треба зауважити, що дане значення залежить від розміру і положення ділянки контролю щодо концентратора.

Експериментальні залежності зміни шорсткості поверхні плакуючого шару від напрацювання при регулярному і випадковому циклічному навантажуванні в подвійних логарифмічних координатах апроксимуються прямими лініями (рис. 3).

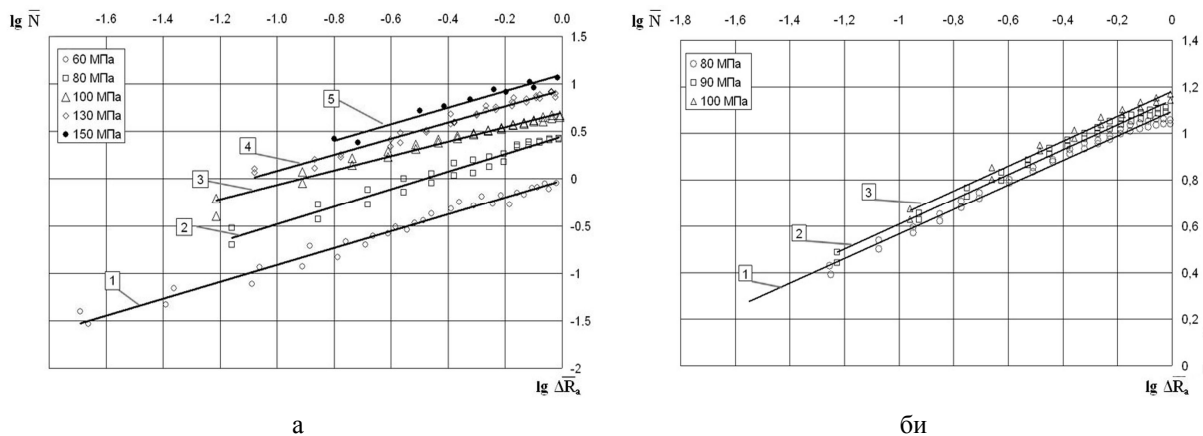


Рисунок 3. Залежності параметра шорсткості  $\bar{\Delta R}_a$  від відносного напрацювання при регулярному (а) і випадковому (б) циклічному навантажуванні. Для регулярного навантажування (а)  $\sigma_{\max} = 60$  МПа(1); 80 МПа(2); 100 МПа (3); 130 МПа (4); 150 МПа (5). Для випадкового навантажування (б)  $\sigma_m = 80$  МПа (1); 90 МПа (2); 100 МПа (3)

Узагальнене рівняння еволюції параметра шорсткості від відносного напрацювання для регулярного і випадкового навантажування має вигляд

$$\bar{\Delta R}_a = a \bar{N}^b. \quad (4)$$

Як і для параметра  $D$  коефіцієнт  $b$  не залежить від рівня напружень і флюктує біля середнього значення  $b = 0,9$  для регулярного і  $b = 0,53$  для випадкового навантажування. Проте коефіцієнт  $a$  має квадратичну залежність від діючих напружень, що дозволяє записати такі залежності:

для регулярного режиму навантажування

$$\bar{\Delta R}_a = 7 \cdot 10^{-4} \sigma_{\max} (\sigma_{\max} - 34) \bar{N}^{0,9}, \quad (5)$$

для випадкового режиму навантажування

$$\bar{\Delta R}_a = 1,93 \cdot 10^{-4} \sigma_m (\sigma_m + 703,6) \bar{N}^{0,53}, \quad (6)$$

де  $\sigma_{\max}$  і  $\sigma_m$  – максимальне напруження циклу і середнє напруження спектра відповідно, що вимірюються в МПа.

Таким чином, збільшення шорсткості суттєво залежить від рівня напруження. При зіставленні результатів при регулярному і випадковому режимах навантажування, що відповідають граничному стану, слід відзначити інтенсивніший приріст нерівностей рельєфу поверхні при випадковому навантажуванні ( $\Delta\bar{R}_a = 12.15$ ) на відміну від регулярного ( $\Delta\bar{R}_a = 3.10$ ) для порівнюваних напружень. При цьому розсіювання значень  $\Delta\bar{R}_a$  для випадкового навантажування істотно нижче, ніж для регулярного.

Пластична деформація поверхні з напрацюванням змінюється також за степеневою функцією, що підтверджується представленням експериментальних даних у подвійних логарифмічних координатах (рис. 4)

$$\varepsilon_a = a\bar{N}^b. \quad (7)$$

При апроксимації коефіцієнтів  $a$  і  $b$  рівняння (7) від діючих напружень отримано:

для регулярного режиму навантажування

$$\varepsilon_a = 1,67 \cdot 10^{-6} \sigma_{\max}^2 \bar{N}^{0,96}, \quad (8)$$

для випадкового режиму навантажування

$$\varepsilon_a = 1,09 \cdot 10^{-6} \sigma_m (\sigma_m + 275,3) \bar{N}^{0,68}. \quad (9)$$

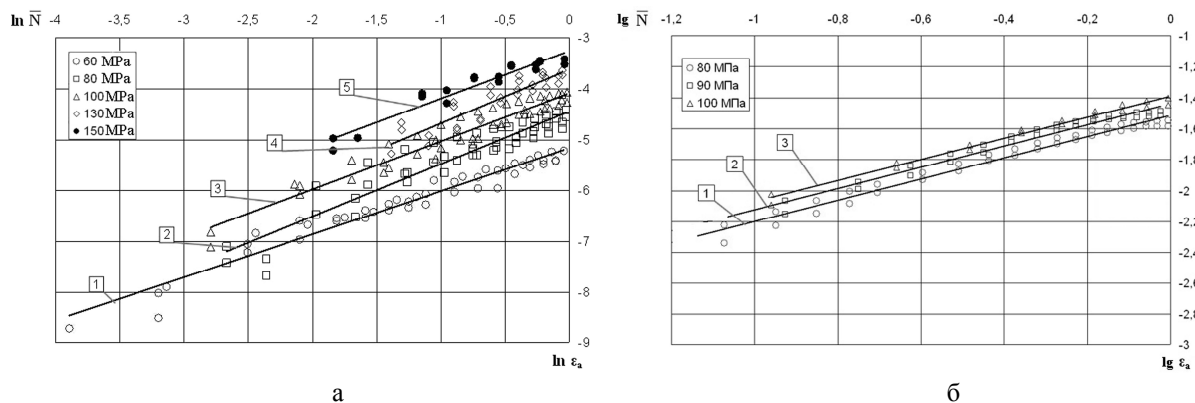


Рисунок 4. Залежності величин пластичної деформації поверхні плакуючого шару від відносного напрацювання при регулярному (а) і випадковому (б) циклічному навантажуванні. Для регулярного навантажування (а)  $\sigma_{\max} = 60$  МПа(1); 80 МПа(2); 100 МПа (3); 130 МПа (4); 150 МПа (5). Для випадкового навантажування (б)  $\sigma_m = 80$  МПа (1); 90 МПа (2); 100 МПа (3).

У зв'язку з тим, що коефіцієнт  $b$  не залежить від рівня напруження і коливається біля середнього значення 0,96 при регулярному і 0,68 при випадковому видах навантажування, процес пластичної деформації поверхні слід розглядувати як автотемельний.

**Висновок.** Показники деформаційного рельєфу на поверхні плакуючого шару алюмінієвого сплаву Д16АТ – насиченість, шорсткість та пластична деформація змінюються з циклічним напрацюванням до утворення тріщини і можуть використовуватися для визначення історії експлуатаційного навантажування та прогнозування залишкової довговічності авіаційної конструкцій.

#### Література

1. [http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/aerospace/563\\_henrich.pdf](http://www.ndt.net/article/wcndt2004/pdf/aerospace/563_henrich.pdf).
2. <http://www.ndt.net/article/ecndt2006/doc/Tu.1.1.1.pdf>.
3. Methods of Early Fatigue Detection / DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory (DSTO-NT-0059); N. Rajic, K. Tsoi. – Melbourne, 1996. – 31p.

4. Моніторинг утоми конструкційних алюмінієвих сплавів / С.Р.Игнатович, М.В.Карускевич, О.М. Карускевич та ін. // Вісник НАУ. – 2004. – № 1(19). – С. 88–91.
5. Игнатович, С.Р. Эволюция поврежденности сплава Д-16АТ у концентратора на стадии до зарождения усталостной трещины [Текст] / С.Р. Игнатович, О.М. Карускевич, М.В. Карускевич // *Авиационно-космическая техника и технология*: Вып. 4 (12). – Харьков: ХАИ, 2004. – С. 29–32.
6. Кооперативные деформационные процессы и локализация деформаций [Текст] / В.А. Лихачев, В.Е. Панин, Е.Э. Засимчук и др. – Киев: Наукова думка, 1989. – 320 с.
7. Горицкий, В.М. Структура и усталостное разрушение металлов [Текст] / В.М. Горицкий, В.Ф. Терентьев – М.: Металлургия, 1980. – 208 с.
8. MiniTWIST. A shortened version of TWIST / LBF Bericht FB-106 (NLR 79018U) ; H. Lowak, J. V. De Jonge, D. Schutz. – Darmstadt-Amsterdam, 1979. – 38 p.
9. Игнатович, С.Р. Контроль качества поверхности деталей с использованием бесконтактного профилометра [Текст] / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, В.И. Закиев // *Авиационно-космическая техника и технология*: Вып. 8 (34). – Харьков: ХАИ, 2006. – С. 20–22.
10. Интерференционный профилометр для контроля топографии поверхности материалов с нанометровым разрешением [Текст] / С.Р. Игнатович, И.М. Закиев, С.С. Юцкевич, [и др.] // *Праці Міжнародної НТК ["Пошкодження матеріалів під час експлуатації, методи його діагностування і прогнозування"]*, (Тернопіль, 21–24 вересня 2009 р.). – Тернопіль: Терн. держ. техн. університет, 2009. – С. 175–179.
11. Деформационный рельеф поверхности как показатель усталостной поврежденности авиационных сплавов на основе алюминия [Текст] / С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, С.С. Юцкевич, [и др.] // *Сб. материалов Третьей междунар. конф. ["Деформация и разрушение материалов и наноматериалов"]*, (Москва, 12–15 окт. 2009 г.). – Т.1. – М.: Интерконтакт Наука, 2009. – С. 53–54.
12. Декларационной патент на полезную модель №3470 «Способ определения остаточного ресурса конструкций по состоянию деформационного рельефа поверхности лакирующего слоя» [Текст] / С.Р. Игнатович, М.В. Карускевич, О.М. Карускевич.

*Отримано 09.08.2011*