

УДК 620.179.1

АНАЛІЗ ЕВОЛЮЦІЇ ДЕФОРМАЦІЙНОГО РЕЛЬЄФУ ПОВЕРХНІ СПЛАВУ Д16АТ ПРИ СТИСКУ ТА РОЗТЯГУ

Т. П. Маслак, канд. техн. наук

Національний авіаційний університет
maslakt@yahoo.com

Для порівняння особливостей процесу розвитку деформаційного рельєфу при стиску і розтягу проведено комплексне дослідження, яке містило комп'ютеризований оптичний моніторинг, рентгеноструктурне дослідження мікронапружень у поверхневому шарі та електронно-мікроскопічне дослідження морфології поверхні. Показано, що інтенсивність накопичення втомного пошкодження плакованого алюмінієвого сплаву Д16АТ на інкубаційній стадії втоми, визначена за деформаційним рельєфом, не залежить від знаку діючого напруження.

Ключові слова: авіаційні конструкції, втома, деформаційний рельєф, фрактальна розмірність.

It has been conducted the investigation for the comparing the features of deformation relief evolution under tension and compression. It includes computer-aided optical monitor, X-ray diffraction analysis of microstress in the surface layer and electron microscope investigation of surface morphology. It has been shown the insensitivity of accumulated fatigue damage of alclad aluminum alloy D16AT at the initial stage of fatigue, which are defined by deformation relief, is not depended of sign stress.

Keywords: aviation structures, fatigue, deformation relief, fractal dimension.

Постановка проблеми та задачі дослідження

Проблема діагностики втомного пошкодження авіаційних конструкцій загострюється у зв'язку з поширенням проектування літаків за принципом «допустимого пошкодження», підвищенням тривалості експлуатації і кількості польотів за час експлуатації. При цьому залишається актуальною вимога мінімізації маси повітряних суден.

Для виготовлення основних конструктивних елементів крила та фюзеляжу літака широко використовуються алюмінієві сплави Д16АТ, В95, 2024 Т3, 7075 Т6. Ці сплави для захисту від корозії плакуються шаром чистого алюмінію.

У результаті дії циклічного навантаження на поверхні зазначених матеріалів утворюється деформаційний рельєф.

Деформаційний рельєф є зовнішньою ознакою локалізованої мікропластичної деформації, яка реалізується шляхом руху дислокацій і дислокаційних перетворень, а на поверхні матеріалу призводить до формування екструзій, інтрузій та смуг ковзання.

Дослідження деформаційного рельєфу показали, що обрані [1] параметри рельєфу (параметр пошкодження D та фрактальна розмірність Dp/s) тісно корелюють з циклічним навантаженням і можуть бути використані в моделях прогнозування залишкового ресурсу конструктивних елементів чи конструкції планера в цілому.

У працях [2; 3] доведено чутливість обраних параметрів до рівня максимального напруження циклу, до асиметрії циклу.

Водночас, важливим є і визначення впливу знаку діючого напруження на процес формування і розвитку деформаційного рельєфу.

Порівняння еволюції параметрів деформаційного рельєфу при стиску та розтягу

Незважаючи на те, що пружні і пластичні властивості металів при розтягу і стиску є подібними, дані про еволюцію дислокаційних структур є достатньо суперечливими. Так, наприклад, у результаті дослідження сплаву АМг6 в умовах розтягу і стиску, показано, що зі збільшенням пластичної деформації зростає густина дислокацій, причому дислокаційна структура матеріалу, деформованого розтягом, характеризується відносно однорідною густиною дислокацій, а в матеріалі, деформованому стиском, існують ділянки зі значною різницею скалярної густини дислокацій. Загальна густина дислокацій в умовах стиску істотно більша, ніж при розтягу за однакових абсолютних значень деформації. Спостереження деформаційного рельєфу дає змогу отримати важливі додаткові дані про нагромадження пошкоджень в умовах стиску і розтягу.

Порівняння процесів втомного пошкодження при стиску і розтягу досить просто виконувати на зразках, які навантажуються консольним згинном — одна зі сторін зразка працює в умовах циклічного стиску, а інша — в умовах розтягу (рис. 1). Проведено серію втомних випробувань з моніторингом еволюції параметрів деформаційного рельєфу: параметра пошкодження D , який визначає насиченість деформаційного рельєфу та

фрактальної розмірності кластерів рельєфу Dp/s за різного значення максимального напруження циклу та різної асиметрії циклу.

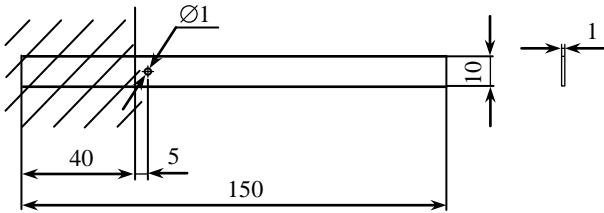
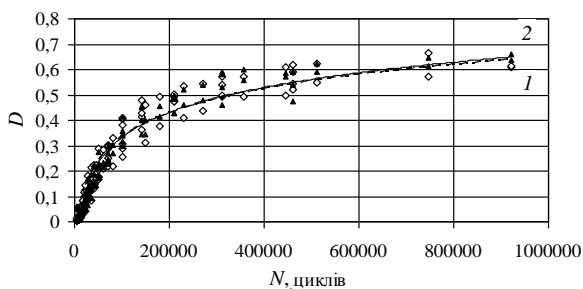


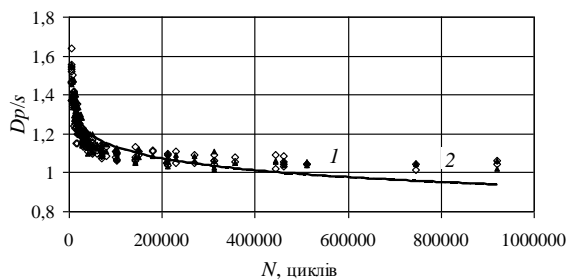
Рис. 1. Зразок для втомних випробувань в умовах консольного згину

На рис. 2 показано еволюцію кількісних параметрів деформаційного рельєфу D і Dp/s при навантаженні з максимальним напруженням $\sigma_{\max} = 173,15$ МПа віднульового циклу розтягу (крива 1) і стиску (крива 2). Відповідно до отриманих даних різниця поточних значень досліджених параметрів не перевищує 7,3 %.

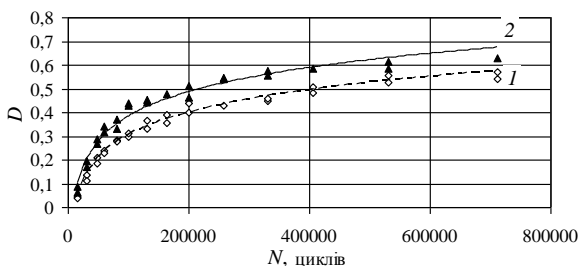
Як видно з наведених графіків, апроксимуючі лінії експериментальних даних еволюції параметрів деформаційного рельєфу при дії напружень розтягу та стиску в більшості експериментів частково або повністю збігаються, і лише в окремих випадках розбіжність становить 7,3 % (у даному випадку найбільша розбіжність була при випробуваннях з максимальним напруженням циклу $\sigma_{\max} = 173,15$ МПа).



а



б



в

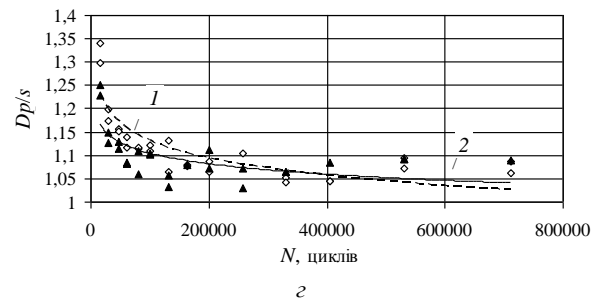


Рис. 2. Еволюція параметрів деформаційного рельєфу при розтяжних (1) та стискальних (2) напруженнях при $R = 0$:

а — еволюція параметра пошкодження D при $\sigma_{\max} = 173,15$ МПа;

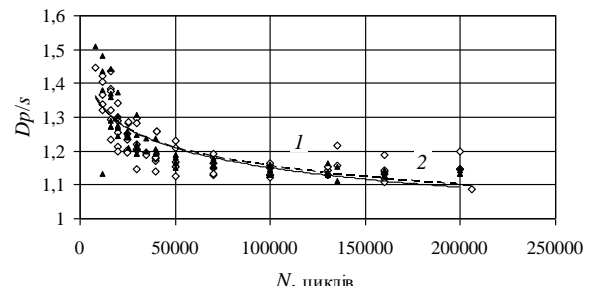
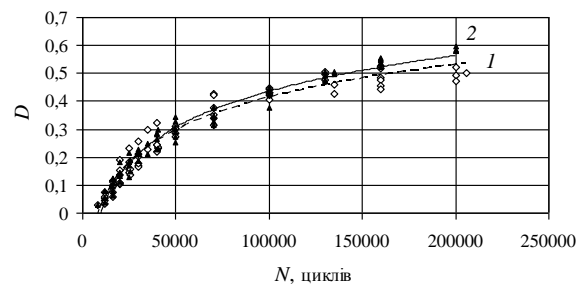
б — еволюція фрактальної розмірності Dp/s при $\sigma_{\max} = 173,15$ МПа;

в — параметра пошкодження D при $\sigma_{\max} = 234,5$ МПа;

г — еволюція фрактальної розмірності Dp/s при $\sigma_{\max} = 234,5$ МПа

Проведення дослідження в статистичному аспекті дало змогу зробити важливий висновок: еволюція обраних параметрів деформаційного рельєфу не залежить від знаку діючих напружень. Зроблений висновок знайшов підтвердження і при асиметричному циклічному навантаженні.

На графіках рис. 3 показано порівняння еволюції кількісних параметрів деформаційного рельєфу при розтягу (крива 1) та при стиску (крива 2) для зразків, які випробовувались за максимального напруження циклу навантаження $\sigma_{\max} = 234,5$ МПа і різних коефіцієнтів асиметрії.



а

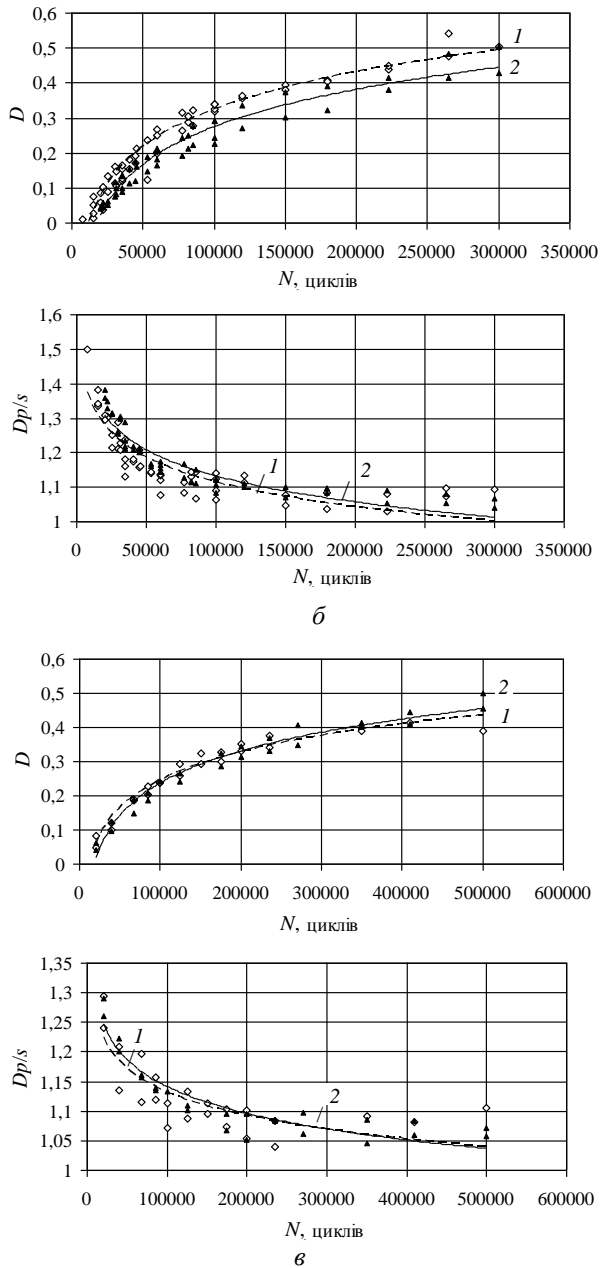


Рис. 3. Еволюція параметра пошкодження D фрактальної розмірності Dp/s при розтягуючих (1) та стискаючих (2) напруженнях, $\sigma_{max} = 234,5$ МПа: а — $R = 0,3$; б — $R = 0,42$; в — $R = 0,5$

При асиметричному циклі навантаження різниця поточних значень досліджених параметрів не перевищує 15 % ($\sigma_{max} = 234,5$ МПа, $R = 0,42$). Отримані залежності є важливою характеристикою інкубаційного періоду втоми.

Висновок про інваріантність параметрів, отриманих за оптичними зображеннями деформаційного рельєфу, до знаку діючих напружень, потребував детального дослідження поверхневих дефектних структур з використанням тонких фізичних методів. Для дослідження мікронапружень у поверхневому шарі було застосовано метод рентгеноструктурного аналізу, а для детального порівняльного аналізу морфології поверхні — сканувальну електронну мікроскопію.

Результати дослідження мікронапружень у поверхневому шарі циклічно деформованого алюмінію методами рентгеноструктурного аналізу

Для аналізу фізичного стану поверхневих дефектних структур було застосовано рентгенографічне визначення мікронапружень другого роду як характеристики напруженого стану.

Було досліджено три зразки розміром $100,0 \times 10,0 \times 1,0$ мм без отвору з різним рівнем напрацювання 400 000, 745 000, 1 000 000.

Відсутність концентратора напружень зумовлена необхідністю аналізу певної ділянки поверхні з постійним рівнем деформації. Максимальні напруження розтягу дорівнювали максимальним напруженням стиску і становили в зоні аналізу 158,0 МПа.

Показником мікронапружень (мікрвикривлень) у поверхневому шарі є ширина інтерференційних ліній. По лініях [111], [222], [200] та [400] було отримано залежності інтенсивності лінії від подвійного брегівського кута.

Як приклад вихідних даних для розрахунку наведено лінії [111] та [222] для зразка № 2, циклічне напрацювання якого становило 745 000 циклів навантаження. Дослідження проводилось на сторонах зразків, де діяли напруження розтягу (крива 1) та на стороні, де діяли напруження стиску (крива 2) (рис. 4).

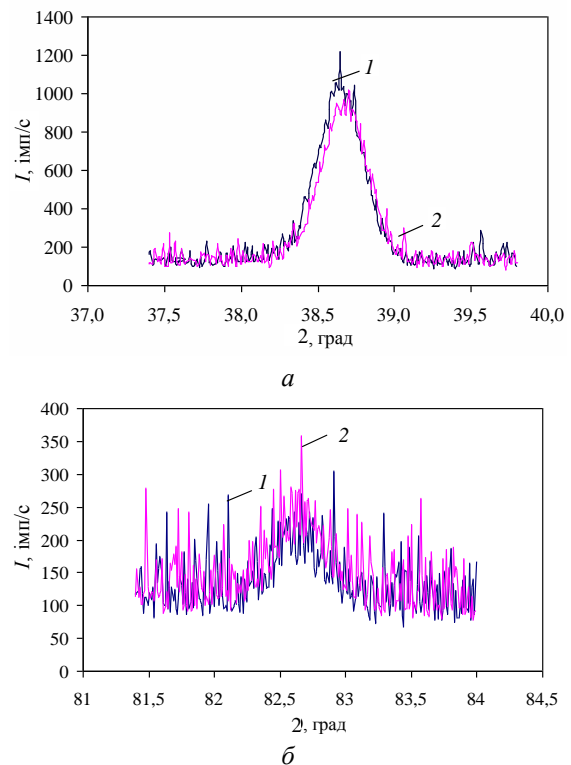


Рис. 4. Залежність інтенсивності ліній від подвійного брегівського кута при розтягу (крива 1) та при стиску (крива 2): а — інтерференційні лінії 111; б — інтерференційні лінії 222

По отриманих рентгенограмах планіметруванням вимірювалась ширина інтерференційних ліній 111 (B_{111}), 222 (B_{222}), 200 (B_{200}), 400 (B_{400}).

Ширина інтерференційної лінії B визначалась за формулою: $B = I/H$, де I — інтегральна інтенсивність інтерференційної лінії; H — висота лінії.

У таблиці наведено порівняння ширини інтерференційних ліній для зразків з різним рівнем напруження при дії розтяжних та стискальних напружень.

Як видно з таблиці, еволюція ширини інтерференційних ліній 111 та 222, 200 та 400 на сторонах, де діють розтяжні та стискальні напруження, в процесі циклічного напруження не виявляє стійкої тенденції, яка б пов'язувала знак напружень і приріст мікронапружень.

Таким чином, виявляються закономірними результати спостереження еволюції деформаційного рельєфу при стиску і розтягу, які вказують на незалежність інтенсивності рельєфу від знаку діючих напружень.

Таблиця 1

Ширина інтерференційних ліній

№ з/п	На стороні, де діяли напруження розтягу, рад·10 ⁻³				На стороні, де діяли напруження стиску, рад·10 ⁻³			
	B_{111}	B_{222}	B_{200}	B_{400}	B_{111}	B_{222}	B_{200}	B_{400}
1	5,8	8,7	6,6	6,8	6,2	9,4	6,4	7,3
2	7,4	12,0	7,3	8,9	6,3	11,0	6,8	7,8
3	5,9	8,5	7,1	10,2	5,7	9,6	7,3	9,6
Еталон	5,7	7,7	6,3	6,8	5,7	7,7	6,3	6,8

Результати дослідження морфології деформаційного рельєфу методом сканувальної електронної мікроскопії

Одним з сучасних інструментів дослідження об'ємних утворень є електронна сканувальна мікроскопія.

Використання сканувальної мікроскопії дає змогу виконати як якісне, так і кількісне оцінювання поверхневих деформаційних структур — екструзій та інтрузій, які формуються і розвиваються при циклічному навантаженні, і порівняти деформаційний рельєф, який формується при стискальних і розтяжних напруженнях.

Досліджувався зразок, попередньо навантажений циклічним згином. Напруження зразка становило 250 000 циклів навантаження. Максимальне напруження циклу навантаження в зоні електронно-мікроскопічного дослідження становило 173,2 МПа.

Розмір його фрагменту, який використовувався для аналізу, дорівнював 12,0×10,0×1,0 мм. Для забезпечення відповідності зон дослідження на обох сторонах зразка була нанесена координатна сітка.

Дослідження проводилось на сканувальному електронному мікроскопі марки SEM-515 фірми «Philips» (Нідерланди). Детальне дослідження параметрів рельєфу виконувалось завдяки можливості нахилу зразка відносно горизонтальної площини. Збільшення мікроскопа, яке дозволило дослідити важливі деталі рельєфу поверхні, становило: ×253; ×1010; ×1620; ×2500.

Аналіз параметрів зміни рельєфу поверхні в зонах розтягу та стиску в середньому і за найбільш характерними параметрами показав таке:

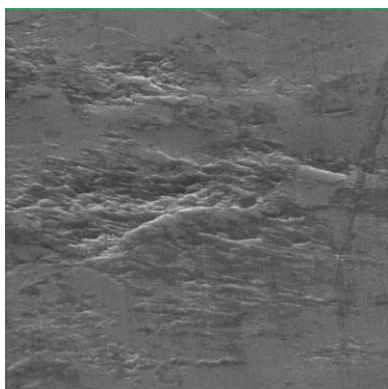
– висота виступів на поверхні розтягу в зонах екструзій h_e^p знаходиться в межах $h_e^p \sim 1,3 \dots 4,5$ мкм, максимальне значення відповідає $h_{e^p}^{\max} \sim 6 \dots 6,2$ мкм;

– висота виступів на поверхні стиску в зоні екструзій знаходиться в межах $h_e^c \sim 1,3 \dots 4,7$ мкм, максимальне значення відповідає $h_{e^c}^{\max} \sim 6,3 \dots 7,7$ мкм;

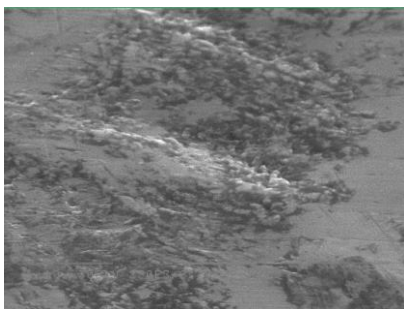
– величина вдавлювань на поверхні розтягу в зоні інтрузій h_i^p знаходиться в межах $\sim 1,6 \dots 3,2$ мкм,

– величина вдавлювань на поверхні стиску в зоні інтрузій h_i^c знаходиться в межах $\sim 1,3 \dots 3,8$ мкм.

У результаті проведених детальних досліджень можна зробити висновок, що найбільш характерні параметри рельєфу поверхні в областях, де діяли напруження розтягу та стиску, в середньому мають приблизно однакові значення: висота виступів у зоні екструзій при розтягу h_e^p та при стиску h_e^c дорівнює $\sim 1 \dots 5$ мкм; величина вдавлювань у зоні інтрузій при розтягу h_i^p та стиску h_i^c дорівнює $\sim 1 \dots 4$ мкм. При цьому мінімальні значення цих параметрів відповідають значенням до ~ 1 мкм, а максимальні до $\sim 6 \dots 8$ мкм. Максимальну величину вдавлювань у зоні інтрузій виміряти складно через обмеження поля зору в цих зонах. На рис. 7 показано зображення деформаційного рельєфу, зроблене за допомогою сканувального електронного мікроскопа при різному збільшенні на поверхнях, де діяли напруження розтягу і стиску.



а



б

Рис. 7. Фрагменти деформаційного рельєфу поверхні:
а — під дією напружень розтягу ($\times 2500$)
та б — під дією напружень стиску ($\times 1620$)

Зазначені результати відповідають висновкам, зробленим на основі порівняльного аналізу оптичних зображень рельєфу, даним про еволюцію обраних параметрів пошкодження і даним рентгеноструктурного аналізу мікронапружень поверхневого шару.

Висновок

Дослідження рельєфу поверхні, який сформувався в умовах розтягу і стиску при симетричному і асиметричному циклах, дало можливість зробити висновок про незалежність еволюції обраних параметрів деформаційного рельєфу від знаку діючих напружень. Це підтверджується результатами рентгеноструктурного дослідження мікронапружень у поверхневому шарі й електронно-мікроскопічними дослідженнями морфології поверхонь, які сформувались при стиску і розтягу. Інваріантність еволюції деформаційного рельєфу відносно знаку діючих напружень дозволяє використовувати при розтягу і стиску загальні моделі прогнозування залишкового ресурсу.

ЛІТЕРАТУРА

1. Karuskevich M.V. Estimation of the accumulated fatigue damage by saturation and fractal dimension of the deformation relief / M. V. Karuskevich, E. Yu. Korchuk, A. S. Yakushenko, T. P. Maslak. *Strength of Materials*, ISSN: 0039-2316, Volume: 40, Issue: 6, Date: November 2008. — P. 693–697.
2. Computer aided optical method for aircraft's components fatigue life estimation: the materials of the 17-th European conference on fracture [“Multilevel approach to fracture of materials, components and structures”] (Brno, 2–5 September 2008). — Brno, Czech Republic, 2008. — P. 2308–2313.
3. Оцінка довговічності плакованих алюмінієвих сплавів при асиметричному циклічному навантаженні / М. В. Карускевич, А. Д. Погребняк, Т. П. Маслак [та ін.] // Вісник НАУ. — 2009. — № 2 (39). — С. 52 – 56.

Стаття надійшла до редакції 13.02.13.