

УДК 620.179.1 (045)

О.Ю. Корчук

НАКОПИЧЕННЯ ПОШКОДЖЕНЬ І РУЙНУВАННЯ КРИСТАЛІТІВ АЛЮМІНІЄВОГО СПЛАВУ

Кафедра конструкцій літальних апаратів, НАУ, e-mail: korchuk.lena@mail.ru

Розглянуто результати дослідження мікротвердості кристалітів алюмінієвого сплаву АД-1 у процесі втоми і моніторингу втомних тріщин. Установлено зв'язок мікротвердості та кінетичних характеристик процесу руйнування. Запропоновано новий підхід до врахування кристалографічної орієнтації монокристалів і кристалітів при прогнозуванні їх довговічності.

Вступ

Конструкції повітряних суден зазнають під час експлуатації різні за величиною і повторюваністю навантаження. Навантажування відбувається як у польоті – від поривів вітру, при маневрах, від надлишкового тиску в гермокабіні, так і під час руху на землі – при пробігу, рулюванні, розбігу. Вказані навантаження можна розділити на дві групи: одноразові навантаження і навантаження, які за один політ повторюються багаторазово. У результаті дії повторних навантажень в елементах конструкцій виникають і розповсюджуються втомні пошкодження – спочатку необоротні зміни структури, потім втомні тріщини. Розвиток утомних тріщин до критичних розмірів може призвести до руйнування конструкції повітряного судна в польоті. Оцінка деформаційного пошкодження в результаті дії нерегулярних навантажень не може бути достатньо точно виконана за допомогою розрахункових методів.

Достатньо ефективно може оцінюватись втомне пошкодження за допомогою зразків-свідків, в яких про стан конструкції можна судити по деформаційному рельєфу, або по розміру втомної тріщини. В разі виготовлення зразка-свідка з монокристалу, що дає певні переваги, необхідно мати дані про тривалість інкубаційного періоду втоми і закономірності розвитку втомних тріщин в монокристалах різних кристалографічних орієнтацій. Такі дані можна отримати як при дослідженні монокристалів, які вирощені за методом Бріджмена, так і шляхом випробувань полікристалічних матеріалів зі структурою, яка дозволяє вивчати властивості окремих кристалітів.

Значна кількість неруйнівних методів контролю, основана на вимірюванні параметрів, які характеризують зміну властивостей матеріалу конструкції. Таким є метод вимірювання мікротвердості [1]. Цінність методу полягає в його високій чутливості і можливості досліджувати зміни, що відбуваються в локальних об'ємах металу. Результати досліджень стану кристалітів алюмінієвих сплавів на першому періоді втоми методом вимірювання мікротвердості описано в працях [2–4].

У праці [5] доведено обумовленість несинхронності змін мікротвердості різних кристалітів різницею їх кристалографічної орієнтації.

Деякі результати моніторингу втомних тріщин в різноорієнтованих кристалах із гранецентрованими кубічними кристалічними ґратами наведено у праці [6].

Унаслідок процесу деформаційного зміцнення відбувається відповідна зміна мікротвердості. Отже, можна припустити, що мікротвердість, тривалість інкубаційного періоду втоми, тривалість стадії розповсюдження тріщини і кінетичні параметри втомних тріщин є характеристиками, що пов'язані з кристалографічною орієнтацією.

Завданням дослідження було визначення найбільш важливих для різних стадій втоми орієнтаційних параметрів, які можуть застосовуватися при проведенні аналізу впливу кристалографічного фактора на процес накопичення деформаційного пошкодження і отримання кореляційних залежностей тривалості стадій втоми і зазначених параметрів.

Методика дослідження

Об'єкти дослідження – зразки алюмінієвого сплаву АД-1, структура якого шляхом спеціальної термомеханічної обробки була перетворена в грубозернисту за методикою [2] з розміром зерна до 15–20 мм, що дозволяло проводити фізико-механічні дослідження окремих зерен.

Розмір зразків становить 130 x 50 x 1,2 мм.

Випробування на втому виконувалися на стандартній гідропульсаційній випробувальній машині МУП-50 з частотою навантаження $f=11$ Гц. Цикл навантаження – синусоїдальний, віднульовий.

Поверхня зразків шляхом механічного полірування алмазними пастами була підготовлена як металографічний шліф.

Дослідження мікротвердості проводилися на мікротвердомірі ПМТ-3. Маса ваги на інденторі становила 20 г.

У зв'язку з тим, що тривалість навантаження і витримування під навантаженням впливають на результат вимірювання мікротвердості, ці параметри були фіксованими і становили 3 і 5 с відповідно.

Особливістю процедури дослідження мікротвердості було виконання вимірювань у статистичному аспекті з кроком вимірювань, що не перевищував очікувані інтервали зміни фізико-механічного стану.

Визначення кристалографічної орієнтації досліджуваних зерен проводилося за рентгенографічним методом Лауе [7]. Для вимірювання довжини тріщини використовувався оптичний мікроскоп із точністю виміру 0,01 мм.

Вимірювання проводилися з інтервалом п'ять тисяч циклів навантаження на початковій стадії і одна–три тисячі циклів при збільшенні швидкості розповсюдження тріщини.

Результати виконання трьох програм дослідження мікротвердості дозволили зробити висновки щодо закономірностей зміни мікротвердості кристалітів алюмінієвого сплаву АД-1 у процесі втоми при різних циклічних напруженнях та встановити зв'язок мікротвердості й кристалографічної орієнтації, мікротвердості й кінетичних характеристик втомних тріщин.

Результати випробувань

Зразки випробувалися на втому при трьох рівнях циклічного напруження: перша програма досліджень – максимальне напруження циклу навантаження 18 МПа, друга – 29 МПа, третя – 38 МПа.

При реалізації першої програми на поверхні одного зразка було визначено шість різноорієнтованих зерен, які досліджувалися з інтервалом напрацювань 50–100 циклів. Ця програма дозволила визначити загальні закономірності зміни мікротвердості.

Для більш детального вивчення змін властивостей кристалітів алюмінію на початковій стадії реалізована друга програма. Дослідження проводилися на дев'яти зразках з мінімальним інтервалом вимірювань один – п'ять циклів. На кожному зі зразків було вибрано один кристаліт (у центральній частині) і визначено його кристалографічну орієнтацію. Орієнтації осей обраних кристалітів в стандартному кристалографічному трикутнику зображено на рис. 1. Ці зразки в подальшому використовувалися для дослідження кінетики росту втомних тріщин. Третя програма також відрізнялась рівнем напружень і передбачала вимірювання мікротвердості п'яти фіксованих зерен однієї твердості одного зразка, який випробувався з інтервалом напрацювань 1000 циклів.

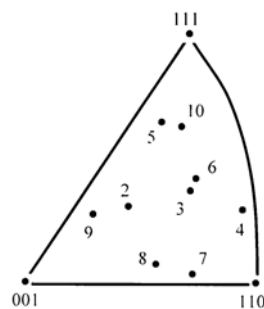


Рис. 1. Кристалографічна орієнтація досліджених кристалітів

Зміну мікротвердості в процесі втоми проілюстровано результатами випробувань трьох різноорієнтованих зразків за другою програмою (рис. 2).

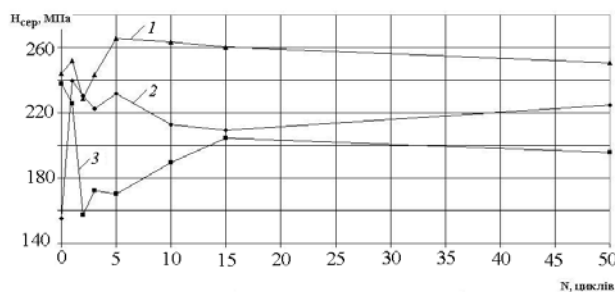


Рис. 2. Зміни середньої мікротвердості різноорієнтованих кристалітів сплаву АД-1: 1 – зразок Т10; 2 – зразок Т3; 3 – зразок Т8

Загальним результатом реалізації всіх програм є зміцнення металу після перших циклів навантаження. Проте у випадку, коли $\sigma = 18$ МПа, крива зміцнення має складний немонотонний характер і відображає наявність сплесків мікротвердості (рис. 3).

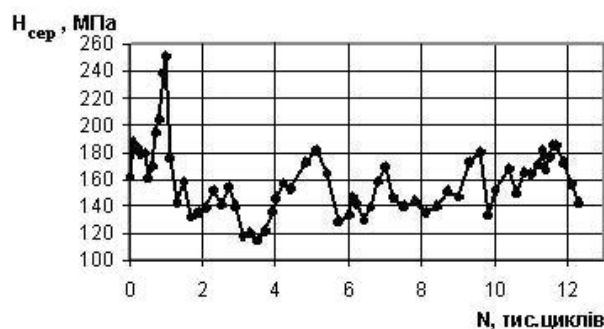


Рис. 3. Зміна середньої мікротвердості сплаву АД-1 при $\sigma = 18$ МПа

При такому режимі випробувань зміни мікротвердості відбуваються практично синхронно у всіх зернах. На початковому етапі втоми можна виявити сплески зміцнення (точки біфуркації), положення яких близько до ряду, запропонованому В.С. Івановою [8].

Серії сплесків описуються рекурентним співвідношенням:

$$\frac{N_1(i)}{N_1(i+1)} = \Delta^{\frac{1}{2^{i+1}}},$$

яке засноване на використанні універсальної константи руйнування металу:

$$\Delta = \frac{L G}{H_0 E},$$

де L – захована теплота плавлення; H_0 – зміна теплоємності при нагріванні від 0 К до температури плавлення; E , G – модулі пружності і зсуву при 0 К.

Для алюмінію $\Delta = 0,225$. Відповідно перші п'ять членів ряду В.С. Іванової [8] дорівнюють: 0,225; 0,474; 0,6887; 0,8298; 0,9109.

Положення базової (першої) точки біфуркації (NBB) повністю характеризує всю серію сплесків мікротвердості та залежить від рівня діючих циклічних напружень, різних конструктивно-технологічних факторів, навколишнього середовища.

Спостереження за змінами мікротвердості фіксованих кристалітів з інтервалом напрацювань 1 – 5 циклів при циклічному напруженні 29 МПа показало, що при першому ж циклі навантаження в деяких зернах відбувається зміцнення (рис. 2). Причому зерна, які мають в початковому стані найменшу твердість, зміцнюються з більшою інтенсивністю.

Приріст мікротвердості в таких зернах на перших циклах становить в середньому 85 %, тоді як в зернах з найбільш високою вихідною твердістю він складає не більше 15 %.

Наступне зниження мікротвердості в менш твердих зернах менш значне і як правило не досягає початкового значення.

На деяких зернах після знеміцнення спостерігається повторне збільшення мікротвердості. До того ж процес зміцнення, який продовжується, після декількох циклів навантаження уповільнюється, оскільки зміцнення з поверхневих шарів металу під дією циклічних навантажень починає розповсюджуватись углиб металу [8].

Після 50 циклів навантаження у всіх зернах спостерігається відносна стабілізація зміни мікротвердості.

Якщо $\sigma = 38$ МПа, криві зміни мікротвердості не мають різких коливань, проте кристаліграфічна орієнтація впливає на інтенсивність процесу.

Після напрацювання 40 000 циклів на зразках, які були випробувані за другою програмою, виконувався надріз, що забезпечувало формування втомної тріщини в кристаліті, орієнтація якого була відомою.

Рівень напружень для спостереження втомних тріщин був обраний 36 МПа, що визначало тривалість стадії розповсюдження тріщини до 200 000 циклів.

Первинний візуальний аналіз стану зразків після їх утомного руйнування дозволив зробити висновки про деякі особливості розповсюдження втомних тріщин в кристалітах алюмінієвого сплаву АД-1:

– в усіх випадках тріщина має транскристалітний характер;

– напрямок розповсюдження тріщини може змінюватися при переході тріщини через границю зерна, тобто зі зміною кристаліграфічної орієнтації;

– у деяких випадках напрямок розповсюдження втомної тріщини не змінюється при переході границь зерен, що може бути обумовлено однорідністю структури зерен.

Моніторинг тріщин дозволив побудувати графіки залежностей довжини тріщини від кількості циклів навантаження (рис. 4).

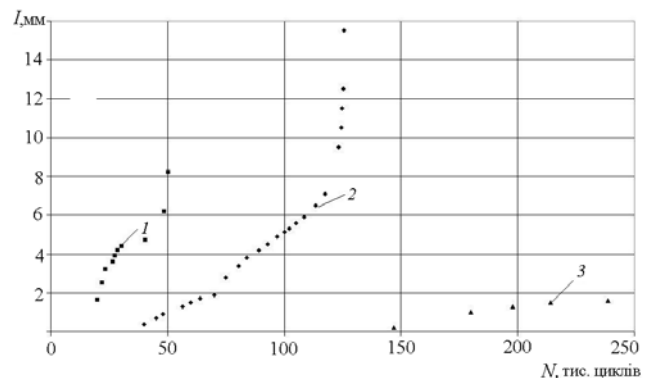


Рис. 4. Залежність довжини тріщини від кількості циклів навантаження кристалітів сплаву АД-1: 1 – зразок Т8; 2 – зразок Т3; 3 – зразок Т10

Дані, отримані при моніторингу тріщин, показують, що кількість циклів до руйнування знаходиться в інтервалі від 52 000 до 270 000 циклів, тобто відрізняється на 80 %.

Різниця в кількості циклів до появи тріщини довжиною 1,5 мм знаходиться в діапазоні від 20 000 до 244 000 циклів, що становить 90 %.

Установлено зв'язок характеристик процесу руйнування зі станом поверхневого шару, а саме мікротвердістю в зоні формування втомної тріщини, а також зв'язок мікротвердості і кінетики втомних тріщин з кристаліграфічною орієнтацією.

При проведенні аналізу отриманих даних було розглянуто роль у процесі накопичення таких орієнтаційних параметрів:

– максимальний фактор Шміда S_{\max} , що визначає максимальні приведені напруження зсуву в первинній системі ковзання;

– Q-фактор, який обчислюється як відношення другого за величиною фактора Шміда до першого, тобто максимального;

– геометричні параметри положення поздовжньої вісі кристалу відносно головних осей стандартного кристалографічного трикутника, що можуть бути визначені як кути між віссю кристалу і осями трикутника [100], [110], [111].

Q-фактор свідчить про схильність кристалу до множинного або одиничного ковзання.

Якщо Q-фактор більше за 0,9, то в кристалі може реалізуватися множинне ковзання, а при Q-факторі менше ніж 0,9 – кристал схильний до одиничного ковзання. Пошук зв'язку між означеними параметрами і механічними характеристиками виявився результативним. У процесі аналізу тривалості інкубаційного періоду втомлювання розглядалися дві групи зразків:

– група зразків, в яких максимальний фактор Шміда не перевищував 0,4;

– група зразків, в яких фактор Шміда перевищував 0,4.

Середня кількість циклів навантаження до формування тріщини відрізняється на 75 %. При цьому мінімальна кількість циклів навантаження до формування тріщини довжиною $l = 1,5$ мм для першої групи зразків дорівнює 198 000 циклів, а для другої – 20 000 циклів. Максимальна кількість циклів навантаження до формування тріщини довжиною $l = 1,5$ мм для першої групи зразків дорівнює 244 000, для другої – 88 000 циклів. Таким чином, тривалість інкубаційного періоду втомлювання пов'язана зі значенням максимального фактора Шміда. Швидкість розповсюдження тріщини залежить від стану матеріалу, в якому вона формується і розвивається. Одним із показників стану є мікротвердість. При плануванні експерименту було зроблено припущення, що зміна мікротвердості, яка є результатом деформаційного зміцнення, впливає на кінетичні характеристики руйнування. Проведений експеримент підтвердив припущення. Для зразків, в яких мікротвердість після циклічного напруження 50 циклів була менше 220 МПа, середня тривалість зростання тріщини від 1,5 мм до руйнування дорівнює 143 000 циклів, а для зразків з мікротвердістю більше 220 МПа – 49 250 циклів. Аналіз даних про зв'язок мікротвердості з кристалографічною орієнтацією виявив особливості, які до цього часу не враховувалися при встановленні орієнтаційних залежностей характеристик міцності. Для кристалітів, які схильні до одиничного ковзання і кристалітів, схильних до множинного ковзання, залежність мікротвердості від максимального фактора Шміда має протилежний характер.

У випадках, коли q-фактор менше 0,9 (одиничне ковзання) збільшення приведених напружень зсуву в первинній системі призводить до підвищення мікротвердості dh (деформаційного зміцнення). Якщо кристалографічна орієнтація сприяє множинному ковзанню (Q-фактор більше 0,9), приведені напруження зсуву в первинній системі не визначають деформаційне зміцнення (підвищення мікротвердості DH). У такому випадку не є значною роль первинної системи ковзання. При пошуку факторів, що визначають наявність залежності процесів втомлювання від кристалографічної орієнтації, проведено аналіз зв'язку тривалостей інкубаційного періоду і періоду розповсюдження втомлювальної тріщини за такими умовами:

– кутами, які утворює поздовжня вісь кристалу з головними кристалографічними напрямками, а саме з вісями кристалографічного трикутника [100], [110], [111] – V_{100} , V_{110} , V_{111} ;

– зі значеннями вихідної мікротвердості H_0 , приросту мікротвердості DH і зазначеними кутами;

– максимальним фактором Шміда S_{max} ;

– урахуванням впливу схильності кристалу до множинного ковзання (Q-фактор).

Таким чином, для різних періодів втомлювання розглянуто аналітичні вирази таких зв'язків:

$$N=A+BH_0;$$

$$N=A+BDH+CH_0;$$

$$N=A+BV_{100}+CV_{110}+KV_{111};$$

$$N=A+BV_{100}+CV_{110}+KV_{111}+LH_0;$$

$$N=A+BV_{100}+CV_{110}+KV_{111}+LH_0+MDH;$$

$$N=A+BDH+CH_0+KQ+LS_{max};$$

$$N=A+BV_{100}+CV_{110}+KV_{111}+LH_0+MDH+ZQ.$$

Результати проведеного множинного кореляційного аналізу наведено в таблиці.

Висновок

Наведені результати дослідження еволюції мікротвердості в процесі втомлювання і аналіз кінетики поширення втомлювальних тріщин дають можливість врахувати кристалографічну орієнтацію монокристалів і кристалітів при прогнозуванні їх довговічності. Основою підходу є висновок про необхідність урахування різних механізмів деформаційного зміцнення в кристалах множинного і одиничного ковзання. Отримані результати дозволяють визначити вплив кристалографічної орієнтації на процес деформаційного зміцнення, кількісно оцінити вплив кристалографічної орієнтації на тривалість інкубаційного періоду втомлювання, визначити кінетичні характеристики втомлювальних тріщин в монокристалах за мікромеханічними характеристиками стану на інкубаційній стадії.

Зв'язок тривалості періодів втоми з дослідженими мікромеханічними та орієнтаційними параметрами

Параметр	Коефіцієнт	Параметр	Коефіцієнт
Інкубаційний період втоми			
A	-1130,29	A	-768,27
H ₀	-0,580512	H ₀	-0,47572
V ₁₀₀	193652	DH	-0,16105
V ₁₁₀	178697	V ₁₀₀	14,328
V ₁₁₁	11,0587	V ₁₁₀	14,1654
		V ₁₁₁	6,32843
R ²	81,66	R ²	82,48
A	154,371	A	655,102
DH	-0,415673	H ₀	-0,669747
V ₁₀₀	0,913892	DH	-0,393814
V ₁₁₀	4,13628	S _{max}	-1389,7
V ₁₁₁	-6,07798	Q	222,971
R ²	76,56	R ²	58,73
Період розповсюдження тріщини			
A	262,288	A	263,747
H ₀	-0,937962	H ₀	-1,04354
		DH	0496426
R ²	48,96	R ²	66,16
A	2009,43	A	1180,86
V ₁₀₀	-25,1715	H ₀	-0,733389
V ₁₁₀	-19,0359	V ₁₀₀	-12,279
V ₁₁₁	-24,5868	V ₁₁₀	-9,16606
		V ₁₁₁	-12,9305
R ²	38,01	R ²	60,7
A	120,535	A	2911,1
H ₀	-1,04032	H ₀	0,142966
DH	0,4071702	DH	-0,347943
V ₁₀₀	2,47436	V ₁₀₀	-31,5637
V ₁₁₀	1,68354	V ₁₁₀	-18,9993
V ₁₁₁	0,924175	V ₁₁₁	-21,5063
		Q	-953,148
R ²	68,14	R ²	94,86

Література

1. Глазов В.М., Вигдорovich В.Н. Микротвердость металлов. – М.: Гос. науч. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1962. – 224 с.
2. Карускевич М.В. Монокристаллический датчик усталостного повреждения конструкций // Дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – К., 1990. – 128 с.
3. Радченко А.И., Кабесас А. Х.М. Полная диаграмма точек бифуркаций процесса усталости алюминиевого сплава Д16 // Металлофизика и новейшие технологии. – 1998. – 20, №5. – С. 72 – 80.
4. Радченко А.И., Карускевич М.В., Корчук Е.Ю. Исследование инкубационного периода усталости кристаллитов алюминиевого сплава АД-1 методом микротвердости // Проблемы системного подхода в экономике: Сб. науч. тр. – К.: КМУГА, 2000. – Вып. 4. – С. 171–174.
5. Радченко О.И., Корчук О.Ю. Измерение микротвердости как способ исследования дискретных процессов при усталости монокристаллов // Авіаційно-космічна техніка і технологія: Зб. наук. пр. – Х.: ХАІ, 2002 – Вып. 34. – С. 181–185.
6. Карускевич М.В., Радченко А.И., Корчук О.Ю. Орієнтаційна залежність утомленості кристалітів алюмінієвого сплаву // Вісн. НАУ. – 2002. – № 2 (13). – С. 146–151.
7. Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электронографический анализ металлов. – М.: Гос. науч. техн. изд-во лит. по черной и цветной металлургии, 1963. – 256 с.
8. Иванова В.С., Терентьев В.Ф. Природа усталости металлов. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.

Стаття надійшла до редакції 09.06.05.

Е.Ю. Корчук

Накопление повреждений и разрушение кристаллитов алюминиевого сплава

Рассмотрены результаты исследования микротвердости кристаллитов алюминиевого сплава АД-1 в процессе усталости и мониторинга усталостных трещин. Установлена связь микротвердости и кинетических характеристик процессов разрушения. Предложен новый подход учета кристаллографической ориентации монокристаллов и кристаллитов при прогнозировании их долговечности.

O.Yu. Korchuk

Accumulation of damage and fracture of aluminium alloy grains

Results of the investigation of aluminum alloy AD-1 grains microhardness under fatigue and results of the fatigue crack monitoring are presented. The link of microhardness with kinetic characteristics of fracture process is determined. New approach for estimation of crystallographic orientation influence on fatigue life of single-crystal and crystallites is proposed.