

УДК 620.179.1(043.3)

**М.В. Карускевич**, к.т.н., доц.  
**Д.М. Костенюк**, студ.  
**Є.В. Каран**, студ.

## ОПТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ НАКОПИЧЕНОГО ВТОМНОГО ПОШКОДЖЕННЯ

*Проведено втомні випробування зразків сплаву D-16AT з моніторингом деформаційного рельєфу поверхні поблизу концентратора напружень. Показано, що безпосередній оптичний контроль стану поверхні дає змогу визначити потенційні зони руйнування.*

*Fatigue tests of the D-16AT specimens with surface deformation relief monitoring near the stress concentrator have been conducted. It was shown, that the direct optical investigation of the surface state allows to estimate potential zones of fracture.*

**алюмінієві сплави, зони руйнування, ідентифікація деформаційного рельєфу, методи діагностики, навантаження, пошкодження**

### Вступ

Втома металу є проблемою дуже широкого кола конструкцій, проте найбільш актуальною вона залишається для конструкцій літаків.

Потреба забезпечення масової ефективності вимагає використання усіх резервів міцності, передбачає високу навантаженість за всіх умов експлуатації. З вимогою мінімізації маси пов'язано використання матеріалів підвищеної міцності, до яких належать конструкційні алюмінієві сплави. Наявність значної кількості різноманітних концентраторів напружень визначає ще одну особливість утомного пошкодження авіаційних конструкцій. Такими концентраторами є отвори під клепку і болти, вирізи, зварні шви та інші потенційні зони локалізації втомного пошкодження і руйнування.

Аналіз втоми авіаційних конструкцій відповідно до вимог авіаційних правил АП-25, а також нормативних документів ІСАО є необхідною процедурою під час розроблення нової авіаційної техніки.

Недостатня точність аналітичних методів кількісного оцінювання накопиченого втомного пошкодження, особливо в разі дії нерегулярного циклічного навантаження, обумовлює необхідність розроблення інструментальних підходів для вирішення вказаної актуальної задачі.

### Аналіз методів інструментального контролю накопиченого втомного пошкодження

Інструментальні методи ґрунтуються на двох підходах:

- діагностика стану матеріалу елемента конструкції;
- діагностика стану зразка-свідка, що закріплюється на поверхні конструкції.

У багатьох випадках для визначення накопиченого втомного пошкодження можуть бути використані методи діагностики, застосовувані для пошуку і кількісного оцінювання дефектів іншого пошкодження:

- метод акустичної емісії, в основі якого – виникнення пружних коливань у разі розриву атомних зв'язків у твердому тілі або перебудови його кристалічної структури;
- метод екзоелектронної емісії, який фіксує зміну щільності лінійних і точкових дефектів;
- рентгенографія;
- оптичний контроль, який раніше обмежувався мікроскопічними дослідженнями, а тепер набув додаткової ефективності з упровадженням голографічного методу;
- метод волоконної оптики та оптичної інтерферометрії;
- аналіз зміни питомого електроопору;
- вихрострумкові методи, основані на аналізі взаємодії зовнішнього електромагнітного поля з електромагнітним полем вихрових струмів, що наводяться збуджувальною котушкою в електропровідному об'єкті контролю;
- магнітний коерцитиметричний метод контролю, де як інформаційний параметр використовується така магнітна характеристика, як коерцитивна сила металу.

В авіації неодноразовими були спроби використання зразків-свідків. Такі пристрої або чутливі елементи закріплюються на конструкції, сприймають навантаження разом з конструкцією і під впливом відповідних деформацій змінюють свої властивості чи руйнуються.

Опис пристрою і роботи деяких пристроїв наведено в роботі [1].

Найбільш успішним є використання індикаторів втоми, які моделюють процеси руйнування, у деяких випадках вони ґрунтуються на можливості контролю росту втомних тріщин в індикаторах. Результати випробувань індикаторів, встановлених на крило транспортного літака, наведено в роботі [2].

Автор роботи [3] запропонував спосіб визначення розвитку пошкодження конструкції. Досить часто використовуються датчики, принцип дії яких ґрунтується на реєстрації зміни електроопору чутливих елементів [4]. У деяких випадках, коли чутливість датчиків недостатня, їх встановлюють на підсилювачах деформації. Чутливим елементом датчика втоми, який реєструє зміни електроопору, може бути плівка струмопровідних композицій [5].

Робота пристроїв для визначення накопиченого пошкодження конструкцій основана на використанні чутливих елементів, які руйнуються у процесі експлуатації конструкцій [6]. Розроблені також датчики з кольоровою індикацією спеціальних плівок, датчики з оптично прозорого матеріалу, за допомогою яких можна спостерігати оптичні картини, які виникають під час деформації, способи, які передбачають зміну інтенсивності дзеркального зображення контрольованої ділянки поверхні.

Стан поверхні містить інформацію про втомне пошкодження поверхні металу. Ця ідея – ключова у способах моніторингу втоми пошкодження – розробляється в Національному авіаційному університеті.

Дослідження еволюції смуг ковзання на монокристалах дало можливість запропонувати монокристалічний індикатор втомного пошкодження [7], а за результатами спостереження деформаційного рельєфу полікристалічного алюмінієвого плаківного шару було розроблено спосіб прогнозування залишкового ресурсу елементів авіаційних конструкцій [8].

Деформаційний рельєф досліджувався методами оптичної та електронної мікроскопії, інтерферонційної профілометрії, отримано значний об'єм експериментальних даних про еволюцію запропонованого параметра пошкодження у процесі циклічного навантаження.

Дослідження поверхневих дефектних структур останнім часом показали, що для їх кількісного опису можна ефективно використовувати методи фрактальної геометрії. Еволюція фрактальної розмірності деформаційного рельєфу досліджується у процесі циклічного навантаження, розглядається можливість урахування як інтенсивності деформаційного рельєфу, так і форми кластерів рельєфу [9].

Водночас, досвід оптичного спостереження деформаційного рельєфу поверхні вказує на можливість виконання порівняльного аналізу стану поверхні без застосування автоматизованих технологій.

З метою обґрунтування можливості візуального неавтоматизованого оцінювання накопиченого пошкодження було проведено експерименти.

### Методика і результати експерименту

Оцінювання накопиченого втомного пошкодження щодо насиченості поверхні ознаками мікропластичної деформації належать до оптичних методів контролю.

Для кількісного оцінювання накопиченого втомного пошкодження запропоновано ряд автоматизованих методик. Проте у ряді випадків, особливо в умовах експлуатації, автоматизоване оцінювання може бути утруднене наявністю дефектів поверхні недеформаційного походження. У таких випадках раціональніше використання візуального порівняння контрольованих структур поверхні з еталонами, які відповідають певним рівням накопиченого втомного пошкодження. Крім того, візуальне неавтоматизоване оцінювання накопиченого пошкодження за станом поверхні може бути використане за наявності великої кількості потенціальних зон руйнування для попереднього відбору зон контролю.

На першому етапі досліджень було проведено втомні випробування стандартних зразків сплаву Д-16АТ на гідропульсуючій машині МУП-20 з частотою навантажування 11 Гц з максимальним напруженням від нульового циклу 120,0 МПа, тобто в режимі, близькому до експлуатаційного.

Контроль поверхні здійснювався за допомогою оптичного металографічного мікроскопу зі збільшенням  $\times 350$  разів. Інтервал напрацьованих становив 10 тис. циклів навантаження на початковій стадії і 20 тис. циклів на заключній стадії пошкодження, що пов'язано з уповільненням процесу накопичення пошкодження.

За результатами випробувань і моніторингу деформаційного рельєфу поблизу концентратора напружень був сформований атлас стану поверхні сплаву Д-16АТ під час його циклічного навантаження.

Оцінювання накопиченого пошкодження здійснювалось пошуком серед поданих в атласі деформаційних структур, поверхні, найбільш близької, за візуально визначеними ознаками, до структури поверхні контрольованого зразка.

Точність визначення накопиченого пошкодження збільшується зі зменшенням інтервалу циклічних напружень, які відповідають певним фотографіям в атласі. Надійність прогнозу довговічності може бути підвищена також урахуванням рівня циклічних напружень, що може бути досягнуто через накопичення в атласі фотографій, що відповідають різним режимам навантаження, зокрема, програмних.

Послідовність операцій під час виконання візуальної ідентифікації деформаційного рельєфу та оцінювання залишкового ресурсу елемента конструкції:

- 1) аналіз навантаженості відповідно до Дос. 9051-AN/896, ICAO, 1987;
- 2) визначення зон контролю;
- 3) перевірка можливості візуальної діагностики:
  - підготовка поверхні, отримання візуальної інформації;
  - моделювання експлуатаційних спектрів навантажень, отримання візуальної інформації про стан лабораторних зразків, формування банку даних;
- 4) оцінювання залишкового ресурсу.

Фотографії об'єкта, що діагностується, показано на рис. 1, зліва, фрагмент атласу стану – справа.

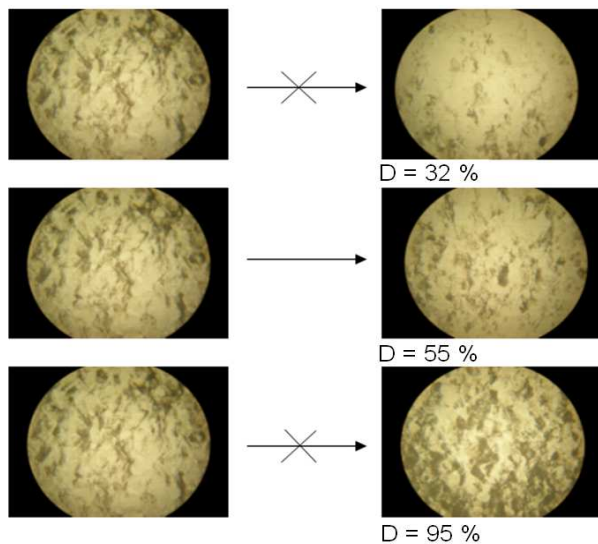


Рис. 1. Приклад пошуку відповідних структур в атласі стану поверхневих дефектних структур

Залишкова довговічність зразка, що контролюється, становила 57000 циклів.

Як видно з рис. 1, візуальне оцінювання дає можливість вибрати з наведених в атласі фотографій стан, найбільш близький за інтенсивністю рельєфу. У такому випадку помилка становила 3000 циклів навантаження, що відповідало 2 %.

На другому етапі можливість застосування візуальної ідентифікації накопиченого деформаційного пошкодження під час натурних випробувань авіаційних конструкцій було доведено через випробування зразків, що моделюють фрагмент обшивки сучасного літака. Розроблено і виготовлено два додаткових види зразків для втомних випробувань. Зразок, який показано на рис. 2, а, виготовлений з листа плакованого алюмінієвого сплаву Д-16АТ товщиною 1,2 мм.

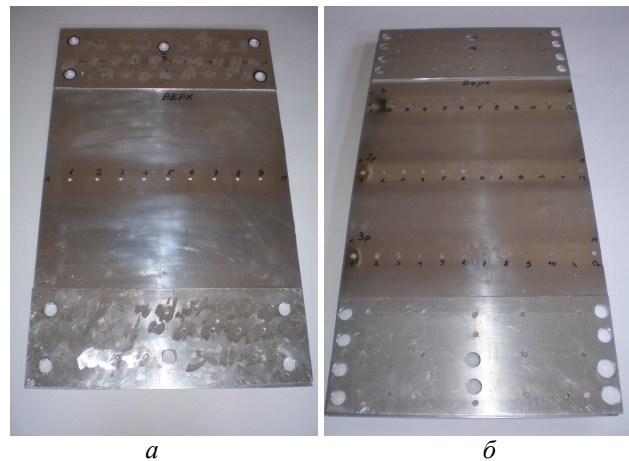


Рис. 2. Зразки з множинними концентраторами напружень:

а – зразок із концентраторами напружень у вигляді отворів; б – зразок, який моделює фрагмент обшивки фюзеляжу з трьома рядами клепоквих з'єднань

У центральній частині зразка перпендикулярно його поздовжній осі – 9 отворів діаметром 4 мм з кроком 30 мм. Габаритні розміри зразка – 320×570 мм.

Проведені втомні випробування дали змогу перевірити можливість моніторингу деформаційного пошкодження і прогнозування зони виникнення втомної тріщини за наявності значної кількості концентраторів напружень і можливого перерозподілу напружень у разі виникнення втомних тріщин. Навантаження проводилось з максимальним напруженням від нульового циклу 100,0 МПа. Результати неавтоматизованого прогнозу послідовності виникнення втомних тріщин було порівняно з автоматизованими розрахунками, які виконувались з використанням параметрів пошкодження  $D$  і  $D_p/s$ , що вказують на інтенсивність деформаційного рельєфу і фактальну розмірність його кластерів.

На схемі зразка з дев'ятьма отворами (рис. 3) показано нумерацію зон контролю (ряд чисел під отворами), а також черговість появи втомних тріщин та їх напрямок (ряд чисел з вказаним напрямком тріщини над отворами).

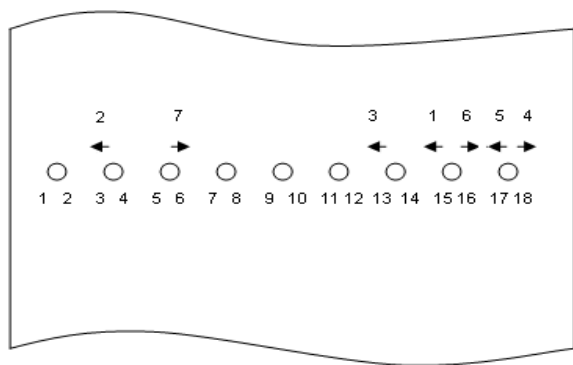


Рис. 3. Зони контролю, напрямок, черговість появи тріщин

Дослідження стану поверхні проводилось після 30 000 циклів. Загальна кількість до руйнування – 117 300 циклів.

Після проведення оптичного контролю зразок був випробуваний до повного руйнування із записом черговості появи тріщини біля кожного отвору. У результаті спостереження за станом поверхні у зоні концентраторів напружень було зафіксовано час формування втомних тріщин у семи точках. У решті зон контролю тріщини сформувались і розвилися під час статичного зруйнування зразка.

Для зазначених семи точок контролю проведено аналітичне оцінювання довговічності і порівняння з довговічністю, визначеною експериментально.

Дані про очікувану і фактичну послідовності формування втомних тріщин наведено в таблиці та на рис. 3.

#### Очікувана і фактична послідовності формування втомних тріщин

Зона контролю	Черговість за результатами			Кількість циклів	
	експерименту	розрахунків	візуальної ідентифікації	зафіксована тріщина	прогнозування появи тріщини
15	1	1	1	79 300	85466
3	2	2	2	79 400	87039
13	3	3	7	85 000	88145
18	4	5	4	85 600	88263
17	5	4	5	92 400	87833
16	6	6	6	103 000	94493
6	7	7	3	111 000	95107

Подальше дослідження передбачає випробування зразків (рис. 2, б), які моделюють реальне клепокве з'єднання обшивки фюзеляжу зі стрингерами. Габаритні розміри зразка – 300×600 мм.

Зразок, виготовлений з листа алюмінієвого сплаву Д-16АТ товщиною 1,2 мм, нараховує три ряди з'єднань, виконаних клепами діаметром 3,0 мм з головкою впотай. Відстань між стрингерами – 120 мм. У кожному ряду з'єднань поставлено 12 клепок. Крок клепок – 25 мм. Фрагмент стрингера виготовлений з бульбоподібного кутового профілю № 710013.

#### Висновки

Результати експерименту підтвердили, що запропонована методика неавтоматизованого оптичного оцінювання накопиченого втомного пошкодження може бути застосована для визначення потенційних зон руйнування елементів авіаційних конструкцій, виготовлених із плакованих алюмінієвих сплавів.

#### Література

1. *Парамонов Ю.М.* Источники информации индивидуального расхода ресурса. Надежность, живучесть и ресурс конструкции летательных аппаратов: учеб. пособие для вузов ГА / Ю.М. Парамонов. – Рига: РКИИГА, 1980. – 78 с.
2. *Белайчук А.К.* Некоторые результаты совместных испытаний индикаторов и крыла транспортного самолета / А.К. Белайчук, Е.Н. Слепечец, И.В. Якобсон // Прочность, надежность и долговечность конструкций, надежность и ресурс конструкций планера ЛА // Межвуз. сб. науч. тр. / под ред. К.Д. Миртова. – Рига: РКИИГА, 1974. – № 1, – Ч. 2. – 110 с.
3. *А. с. № 962792 СССР.* Способ определения скорости развития поврежденных в конструкции / В.Е. Михайлов. – Кл. G 01 – N 3/32 // Институт физико-технических проблем Севера СО АН СССР. – 1987.
4. *Eeles E.G.* An exploratory evaluation of the fatigue life gauge / E.G. Eeles, R.C. Thurston // Eng T. - Trans Eng.Inst.Canada, 1969. – Vol. 52, N 3. – P. 12–15.
5. *Проблеми прочності.* – 1981. – № 9.
6. *А. с. № 1104385 СССР,* Кл. G 01 N 3/32 / Ю.Г. Михайлов, Н.А. Елгаев (СССР). – № 3320446/25-28; Заявл. 17.03.83; Оpubл. 23.07.84. – Бюл. № 27. – 1 с.
7. *А. с. 15802118 СССР* Способ контроля усталостной повреждаемости элементов конструкций / М.В. Карускевич, Е.Е. Засимчук, А.И. Радченко, Ю.А. Лебедев. – Заявл. 10.04.89; Оpubл. 30.10.89, Бюл. № 26. – 3 с.
8. *Моніторинг* втоми конструкційних алюмінієвих сплавів / О.М. Карускевич, С.Р. Ігнатович, С.В. Хижняк та ін. // Вісник НАУ. – 2004. – № 1(19). – С. 88–91.
9. *Оценка* накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М.В. Карускевич, Т.П. Маслак, Е.Ю. Корчук, А.С. Якушенко // Пробл. прочності. – 2008. – № 6. – С. 128–133.