

УДК 620.179.1(045)

¹М.В. Карускевич, к.т.н., с.н.с., доц.²О.Ю. Корчук, к.т.н., с.н.с., доц.³Т.П. Маслак, к.т.н., асист.⁴С.В. Щепак, асист.⁵А.А. Капустинський, студент

ВИМОГИ ДО ДІАГНОСТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ ВТОМИ ЕЛЕМЕНТІВ АВІАЦІЙНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Національний авіаційний університет

¹E-mail: mkaruskevich@hotmail.com²E-mail: korchuk.lena@mail.ru³E-mail: maslakt@yahoo.com⁴E-mail: svskiev@mail.ru⁵E-mail: andruskyev@mail.ru

Проведено аналіз сучасних методів контролю фізико-механічних характеристик матеріалів, пов'язаних із накопиченням утомного пошкодження. Сформульовано вимоги до діагностичних параметрів при неруйнівному контролі втоми елементів авіаційних конструкцій. Показано можливість застосування параметрів деформаційного рельєфу, який формується на поверхні плакувального шару за циклічного навантажування для кількісної оцінки накопиченого втомного пошкодження.

The paper presents the analysis of modern methods of physical-mechanical characteristics of metals testing, which are bounded up with accumulation of fatigue damage. It has been defined the requirements to diagnostic parameters of nondestructive testing of fatigue of aviation construction elements. It has been shown the ability of application of deformation relief parameters, which is formed on the surface of alclad layer under cyclic loading for the quantitative estimation of accumulated fatigue damage.

Выполнен анализ современных методов контроля физико-механических характеристик материалов, связанных с накоплением усталостного повреждения. Сформулированы требования к диагностическим параметрам при неразрушающем контроле усталости элементов авиационных конструкций. Показана возможность применения параметров деформационного рельефа, который формируется на поверхности плакирующего слоя при циклическом нагружении для количественной оценки накопленного усталостного повреждения.

Проблема втоми авіаційних конструкцій

Сучасні літаки цивільної авіації розраховані на експлуатацію протягом декількох десятиріч з кількістю польотів більше 50 тисяч. Це визначає актуальність досліджень втоми конструкційних матеріалів, елементів конструкцій, літаків у цілому.

Моніторинг індивідуального вичерпання ресурсу літака є одним із шляхів забезпечення економічної ефективності та безпеки експлуатації. У зв'язку з цим проводяться роботи зі створення інструментальних методів оцінки накопиченого втомного пошкодження.

Найбільш ефективні методи неруйнівного контролю базуються на контролі дефектних структур на мікро-, мезо- і макрорівнях та сучасних уявленнях про природу втомного пошкодження металів.

Контроль фізико-механічних характеристик металів при втомі

Процес деградації експлуатаційних властивостей металів в умовах циклічного навантажування і відповідне вичерпання несучої здатності металевих конструкцій є монотонним. Стадійна природа втомного пошкодження зумовлює і стадійність зміни ряду параметрів фізико-механічного стану.

Розглянемо деякі чутливі до структурних змін деформаційного походження сучасні методи неруйнівного контролю і особливості зміни їх діагностичних параметрів.

Чутливим до структурних перетворень на дислокаційному рівні є неруйнівний ультразвуковий метод зворотного розсіювання за допомогою електромагнітного та імерсійного перетворювачів.

Мінімум і максимум коефіцієнта затухання ультразвукових хвиль [1] показано на рис. 1, де можна виділити певні ділянки:

- зниження коефіцієнта;
- зростання коефіцієнта;
- падіння коефіцієнта після досягнення максимуму.

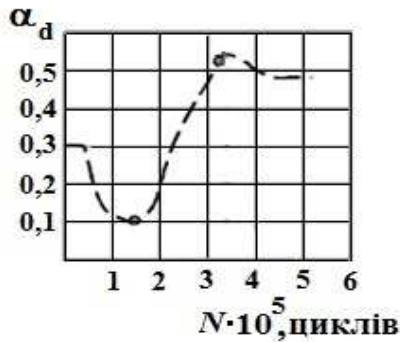


Рис. 1. Залежність коефіцієнта затухання ультразвукових хвиль α_d від кількості циклів N для сталей

Метод мікротвердості дозволяє:

- відслідковувати локальне накопичення втомного пошкодження у типових концентраторах напружень – отворів;
- оцінювати стан поверхневого шару, що дуже важливо, оскільки саме в поверхневому шарі металу пошкодження проходить випереджаючими темпами.

Немонотонний характер зміни мікротвердості відзначався в роботі [2].

У роботах [3; 4] спостерігали осциляції мікротвердості у ході випробувань на втому монокристалів алюмінію А-6 (рис. 2).

У роботі [5] наведено результати дослідження пошкоджуваності металів при втомі та циклічному фретингу з використанням методів:

- статичної петлі гістерезису;

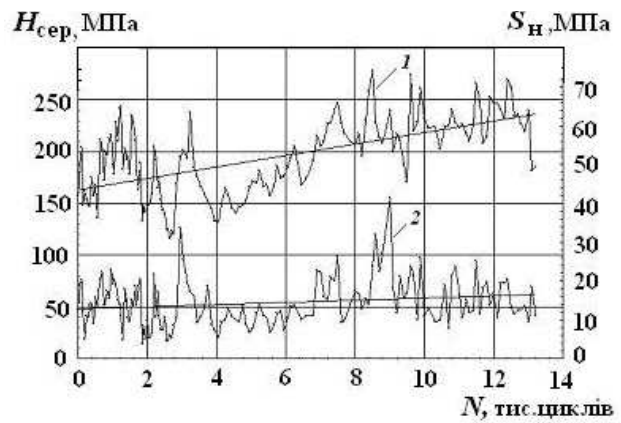


Рис. 2. Змінювання середньої мікротвердості (1) та її середньоквадратичного відхилення (2) ($\sigma = 18,0$ МПа)

- електроіндуктивного;
- внутрішнього тертя;
- рентгеноструктурного.

Метод статичної петлі гістерезису як характеристика зміцнення використовує зміну згинального моменту при постійній амплітуді статичної деформації.

Електроіндуктивний метод базується на вимірюванні витрат на перемагнічування і вихрові токи, які виникають у матеріалі зразка під час дії електромагнітного поля.

Вимірювання амплітудно незалежного внутрішнього тертя дозволило дослідити зміни на дислокаційному рівні.

Рентгеноструктурним методом визначались мікронапруження другого роду.

Метод статичної петлі гістерезису дозволив виділити п'ять стадій зміцнення-знеміцнення у разі циклічного навантажування монокристалів кремністого заліза (рис. 3).

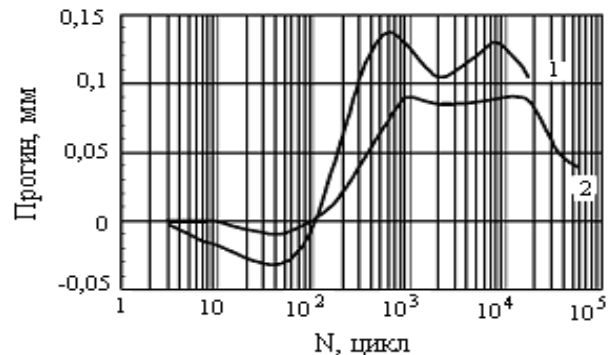


Рис. 3. Відносна зміна згинального моменту при циклічному навантажуванні монокристалів кремнію заліза:
1 – $\epsilon_a = 0,47$ %;
2 – $\epsilon_a = 0,39$ %

Періодичну зміну характеристик міцності спостерігали і у ході випробування полікристалічного армко-заліза.

Дослідження внутрішнього тертя армко-заліза показало наявність п'яти стадій у разі багатоциклової втоми і трьох стадій у разі малоциклової втоми (рис. 4).

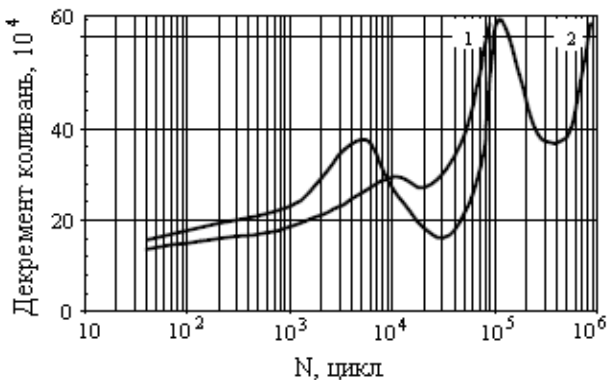


Рис. 4. Зміна декременту коливань при циклічному навантажуванні армко-заліза:

1 – $\varepsilon_a = 0,1\%$;
2 – $\varepsilon_a = 0,15\%$

Складний стадійний процес виявляють також зміни мікронапружень та імпедансу.

Наведені приклади методів дослідження фізико-механічного стану металів, які працюють в умовах циклічного навантажування, не відображають усього спектра сучасних методів неруйнівного екоконтролю, що можна застосовувати для оцінювання накопиченого втомного пошкодження, проте дозволяють визначити деякі спеціальні вимоги до діагностичних параметрів під час оцінювання пошкодження.

У процесі циклічного навантажування значна кількість характеристик стану металів змінюється немонотонно. Циклічне навантажування супроводжується їх ростом, падінням, стабілізацією.

Такий немонотонний характер еволюції фізико-механічних характеристик металу зумовлює необхідність постійного їх моніторингу. За умови реалізації такого моніторингу зазначені методи можуть бути достатньо ефективними. Крім того, цінність методів зумовлена можливістю дослідження природи втомного пошкодження, спостережень за процесом втоми на дислокаційному рівні.

Коли оцінка технічного стану проводиться періодично, наприклад, у разі технічного обслуговування літака, необхідно використовувати методи, діагностичні параметри яких змінюються монотонно, відповідно до загального процесу вичерпання ресурсу.

Оптичний комп'ютеризований неруйнівний метод контролю втоми базується на кількісній оцінці деформаційного рельєфу в зонах локалізації пошкодження.

Деформаційний рельєф як індикатор втомного пошкодження

Деформаційний рельєф можна спостерігати на металах, схильних до формування стійких смуг ковзання, екструзій та інтрузій на поверхні. Деформаційний рельєф не спостерігається на поверхні сплаву Д16АТ, якщо сплав не плакований.

За наявності плакувального шару алюмінію деформаційний рельєф можна спостерігати поблизу концентраторів напружень в експлуатаційних умовах вже після декількох тисяч циклів навантажування. Деформаційний рельєф, який сформувався поблизу отвору в зразку алюмінієвого сплаву Д16АТ після 400 000 циклів навантажування за максимального напруження віднульового циклу 173 МПа, показано на рис. 5.

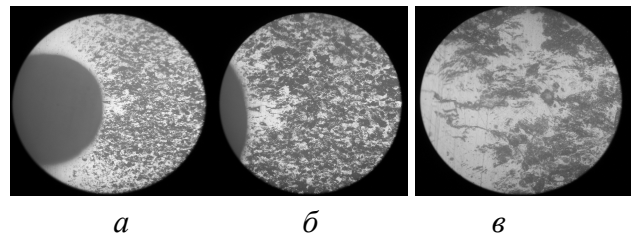


Рис. 5. Деформаційний рельєф плакувального шару сплаву Д16АТ поблизу отвору за різного збільшення оптичного мікроскопу:

а – 75 разів;
б – 150 разів;
в – 500 разів

Оптичне зображення деформаційного рельєфу в процесі циклічного навантажування показано на рис. 6.

Формування смуг ковзання, екструзій і інтрузій передуює появі втомної тріщини і є незворотнім.

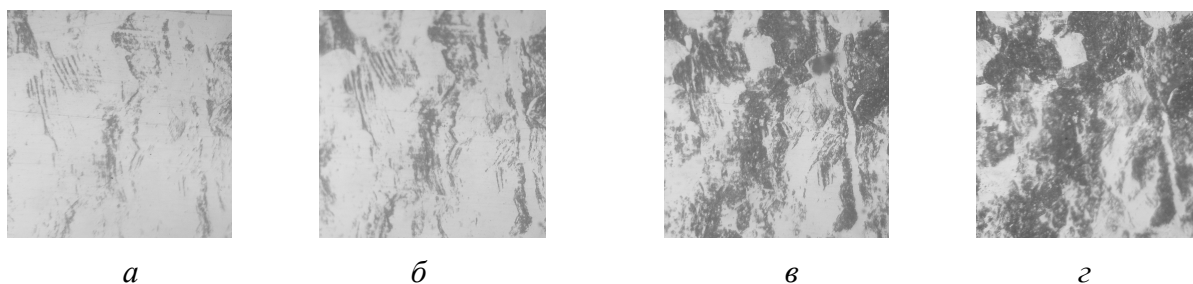


Рис. 6. Еволюція деформаційного рельєфу в процесі циклічного навантажування ($R = 0$):

$a - N_{\text{зал}} = 99\%$;
 $б - N_{\text{зал}} = 98\%$;
 $в - N_{\text{зал}} = 94\%$;
 $г - N_{\text{зал}} = 84\%$

У роботах [6; 7; 8] показано, що для кількісної оцінки втомного пошкодження можна застосовувати два параметри рельєфу:

– параметр пошкодження D , який обчислюється як відношення площі з ознаками мікропластичної деформації до загальної площі досліджуваної ділянки;

– фрактальна розмірність Dp/s , яка характеризує форму кластерів деформаційного рельєфу.

Обидва параметри монотонно змінюються в процесі циклічного навантажування.

Зміну параметра пошкодження D у процесі циклічного навантажування в умовах осьового розтягу при $\sigma_{\text{max}} = 117,7$ МПа показано на рис. 7.

Еволюцію фрактальної розмірності Dp/s у відносних координатах показано на рис. 8 (N – напруження в процентах довговічності до моменту появи втомної тріщини довжиною 1,0 мм).

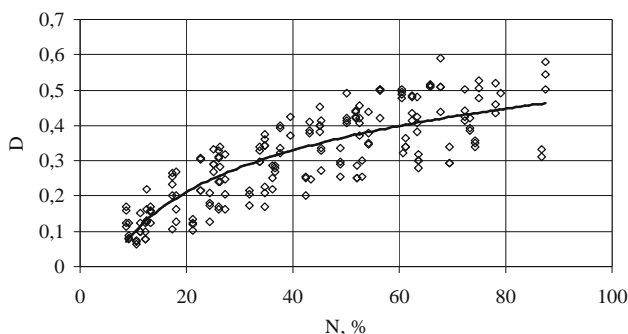


Рис. 7. Еволюція параметру пошкодження в процесі циклічного навантажування

Метод можна застосувати як для безпосередньої діагностики елементів конструкцій, виготовлених з плакованого алюмінієвого сплаву, так і шляхом контролю стану зразків-свідків (сенсорів) [9].

Регресійні моделі, отримані в результаті проведення втомних випробувань у широкому діапазоні режимів навантажування, дозволяють визначати накопичене пошкодження і прогнозувати залишковий ресурс елементів конструкцій.

Висновки

Для інструментального контролю процесу вичерпання ресурсу елементів авіаційних конструкцій необхідно застосувати неруйнівний метод, діагностичні параметри якого:

– дозволяють відслідковувати процес деградації несучої здатності елементів конструкцій як у разі безперервного, так і періодичного контролю;

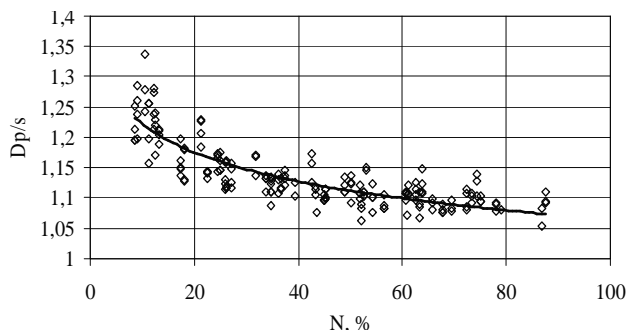


Рис. 8. Еволюція фрактальної розмірності Dp/s в процесі циклічного навантажування

– забезпечують контроль стану металу в зонах локалізації пошкодження, зокрема у концентраторів напружень;

– монотонно змінюються протягом усього періоду спостережень;

– чутливі до параметрів циклу навантажування.

Зазначеним вимогам відповідає комп'ютеризований оптичний метод оцінки накопиченого втомного пошкодження і залишкового ресурсу, який базується на кількісній оцінці параметрів деформаційного рельєфу поверхні.

Література

1. *Иофин И. Д.* Об установке усталостных испытаний стальных образцов с применением неразрушающего акустического метода контроля / И.Д. Иофин, В.Л. Бусов, И.В. Шишкин // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2008. – № 3Е (14). – С. 61–65
2. *Иванова В.С.* Природа усталости металлов / В.С. Иванова, В.Ф. Терентьев. – М.: Металлургия, 1975. – 456 с.
3. *Радченко О.І.* Измерение микротвердости как способ исследования дискретных процессов при усталости монокристаллов / О.І. Радченко, О.Ю. Корчук // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – Х.: ХАІ, 2002. – Вип. 34. – С. 181–185.
4. *Корчук О.Ю.* Накопичення пошкоджень і руйнування кристалітів алюмінієвого сплаву / О.Ю. Корчук. – Вісник НАУ. – 2005. – №3. – С. 112–115.
5. *Изменение* структурно-напряженного состояния при усталости и фретинг-усталости / В.В. Шевеля, Г.С. Калда, А.С. Трытек, В.А. Кирилков // Проблеми трибології. – 2009. – № 3. – С. 6–13.
6. *Оценка* накопленного усталостного повреждения по насыщенности и фрактальной размерности деформационного рельефа / М.В. Карускевич, Е.Ю. Корчук, Т.П. Маслак и др. // Проблемы прочности. – 2008. – № 6 (396). – С. 128–135
7. *Маслак Т. П.* Регресійні моделі еволюції параметрів деформаційного рельєфу під час циклічного навантажування / Т. П. Маслак // Вісник НАУ. – 2008. – № 1 (34). – С. 89–92.
8. *Non destructive optical method under full-scale aircraft testing as a method of fatigue life prediction: materials of the 4 world congress, 21-23 Sept. 2010, Kyiv.* Т.1. – К.: ICAO, National Academy of Sciences of Ukraine, National Aviation University, 2010. – Р. 13.21–13.24. (Aviation in the XXI-st Century «Safety in Aviation and Space Technologies»).
9. *Структурна* пошкоджуваність і руйнування зразків-свідків втомного пошкодження / М.В. Карускевич, О.Ю. Корчук, Т.П. Маслак та ін. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – 2008. – № 9 (56). – С. 110–114.

Стаття надійшла до редакції 07.12.2010.