

ВИХРОСТРУМОВИЙ МОНІТОРИНГ ДЕГРАДАЦІЇ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПІД ЧАС ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

В.М. Учанін¹, О.П. Осташ¹, С.А. Бичков², О.І. Семенець², В.Я. Дереча²

¹Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України. 79060, м. Львів, вул. Наукова, 5.
E-mail: vuchanin@gmail.com

²ДП «Антонов». 03062, м. Київ, вул. Академіка Туполева, 1. E-mail: info@antonov.com

Моніторинг деградації алюмінієвих сплавів є дуже важливою частиною стратегії підтримки льотної придатності старіючої авіаційної техніки. Наш підхід базується на можливості знайти кореляції між параметрами матеріалу, які можна визначити без руйнування, і характеристиками циклічної тріщиностійкості контрольованого матеріалу. Показано, що питома електропровідність як структурно-чутливий параметр алюмінієвих сплавів, виміряна вихрострумним методом, може бути використана в якості ефективного інструменту такого дослідження. Головна перевага вихрострумного методу полягає в можливості проводити вимірювання без прямого контакту з контрольованою поверхнею. З точки зору вихрострумного методу авіаційна конструкція може бути представлена як тришаровий об'єкт, який складається з діелектричного захисного покриття, антикорозійного плакування чистого алюмінію товщиною 0,5 мм і обшивки з алюмінієвого сплаву, який підданий експлуатаційним навантаженням. Для вимірювання електропровідності в цьому третьому шарі з високим рівнем заглушення впливу зазору (до 0,5 мм) розроблений новий вимірювач електропровідності типу ВЕПР-31. Отримано кореляцію між видовженням і втомною границею міцності деградованих сплавів типу Д16Т і В95Т1 для різних еквівалентних напружень. Вихрострумні вимірювання питомої електропровідності, проведені на тривало-експлуатованих літаках АН-12 (виробництво 1966 р.) в умовах авіаремонтного заводу в різних зонах крила, підтвердили ефективність запропонованої методології. Бібліогр. 27, рис. 8.

Ключові слова: авіаційна техніка, алюмінієві сплави, деградація, вихрострумний метод, електропровідність, циклічна тріщиностійкість

Неруйнівний контроль (НК) відповідальних конструкцій під час експлуатації здебільш виконують з метою виявлення дефектів втомного і корозійного походження [1–3]. Разом з цим все більшого значення набуває проблема своєчасного оцінювання механічних характеристик матеріалів конструкцій, які змінюються в процесі деградаційних змін структури під дією експлуатаційних чинників, до яких можна віднести вплив підвищеної температури, статичних і циклічних навантажень, корозійного середовища, радіації тощо [4, 5]. Отримані дані необхідні для оцінювання надійності конструкцій і прогнозування їх ресурсу.

Експлуатаційна деградація конструкційних алюмінієвих сплавів (АС) пов'язана з дією багатьох чинників, серед яких найвпливовішими є статичні і циклічні навантаження, температура, вплив агресивних середовищ тощо [6–9]. Зазначені чинники впливають на матеріал конструкцій у різний спосіб, що призводить до збільшення кількості дисперсних інтерметалідів і густини дислокацій, дифузії легувальних елементів і їх сегрегації вздовж меж зерен, мікророзтріскування включень вторинної фази тощо [7, 9]. Особливе значення має синергія експлуатаційних чинників, коли кожний з них окремо не призводить до суттєвої деградації матеріалів,

а вирішальне значення має їх сумісна дія. Без оцінювання деградаційної зміни механічних властивостей матеріалів неможливе достовірне оцінювання залишкового ресурсу конструкцій і, зокрема, експлуатація літаків за сучасним принципом допустимої пошкоджуваності. Деградацію властивостей АС можна оцінювати руйнівними і неруйнівними методами [9]. Руйнівні методи встановлення реальних ресурсних характеристик матеріалів базуються на механічних випробуваннях зразків-свідків чи зразків, вирізаних з експлуатованих конструкцій під час ремонту та заміни окремих частин конструкцій. Під час експлуатації такий підхід об'єктивно неможливий, що стимулює пошук інших підходів і актуалізує необхідність експлуатаційного моніторингу деградаційних змін структури матеріалів методами НК.

Наш підхід базується на пошуку і використанні кореляцій між фізичними структуро-чутливими параметрами матеріалу, які можна визначити методами НК, і механічними характеристиками матеріалу за статичного і циклічного навантаження, які, з одного боку, чутливі до змін структури і деградації матеріалу, а з іншого – необхідні для розрахунку залишкового ресурсу конструкцій [10, 11]. Схема



Рис. 1. Взаємозв'язки між умовами експлуатації, структурою та фізичними і механічними характеристиками алюмінієвих сплавів

взаємозв'язків, які призводять до формування таких кореляцій для АС, наведена на рис. 1.

Очевидно, що умови експлуатації, зокрема характер механічних напружень, температура, корозійне середовище, впливають на зміну властивостей матеріалу, серед яких мікроструктурний і фазовий склад, щільність дислокацій та залишкові напруження, які можна вважати найбільш визначальними (рис. 1). У свою чергу властивості матеріалу одночасно впливають на структурно-чутливі фізичні параметри матеріалу, які можна визначити засобами НК, і механічні характеристики матеріалу. Подібний підхід використано нами для контролю деградаційних змін феромагнітних сталей парогонів теплових електростанцій на основі вимірювання коерцитивної сили матеріалу [12]. Очевидно, що такий підхід вимагає поєднання сучасних підходів механіки руйнування з розвитком можливостей НК.

Для АС структурно-чутливими параметрами НК можуть бути питома електропровідність (ПЕП) і термоелектрорушійна сила (ТЕРС) [5, 6, 11]. Наші попередні дослідження показали, що вибір ПЕП в якості структурно-чутливого параметра має суттєві переваги через можливість її безконтактного вимірювання вихрострумовим методом через шар лакофарбового покриття [13]. Зазначена на рис. 1 анізотропія ПЕП також може бути перспективним напрямком розвитку методів моніторингу деградації АС за умови створення засобів її визначення, які поки що знаходяться на початковому етапі [14].

Новизною нашого підходу є пошук кореляцій між ПЕП і характеристиками циклічної тріщиностійкості (ХЦТ), які необхідні для розрахунку залишкового ресурсу конструкцій авіаційної техніки на відміну від попередніх робіт [15, 16], де досліджували кореляції ПЕП з такими характеристиками АС, як твердість, границя міцності, границя текучості, відносне видовження. На рис. 1 ХЦТ обведені пунктирною лінією.

Слід зазначити, що характеристики існуючих вихрострумових структуроскопів, побудованих на вимірюванні ПЕП, не дозволяють визначати зміни ПЕП під час контролю деградаційних змін матеріалу авіаційних конструкцій через обмежений діапазон відстроювання від змін товщини захисних діелектричних покриттів (ДП) і зазору, а також низьку глибину контролю [15, 18]. Відомі закордонні прилади, зокрема Sigmatest і Sigmachek, мають недостатню локальність контролю через великий (більше 7 мм) діаметр робочої площадки вихрострумового перетворювача (ВСП) і застосовуються здебільш на металургійних підприємствах для контролю якості термообробки. Тому виникла необхідність оптимізувати параметри вихрострумового контролю і розробити новий вихрострумовий структуроскоп з локальним ВСП і покращеними метрологічними характеристиками щодо глибини контролю і діапазону відстроювання від товщини ДП і зазору.

Розроблення засобів для безконтактного вимірювання питомої електропровідності алюмінієвих сплавів в умовах експлуатації авіаційної техніки. Для забезпечення НК авіаційних конструкцій під час експлуатації вихрострумовий структуроскоп має відповідати наступним загальним вимогам:

- забезпечити високу локальність контролю авіаційних конструкцій, які характеризуються кривизною поверхні з великою кількістю отворів під заклепку;
- забезпечити контроль через шар захисного ДП без його видалення;
- забезпечити контроль змін структури у внутрішніх шарах матеріалу конструкцій.

Перша вимога може бути вирішена вибором робочого діаметра ВСП, який не повинен перевищувати 1,2 мм. Друга вимога до структуроскопів потребує реалізації способів, які можуть розширити діапазон

відстроювання від впливу змін зазору між робочою поверхнею ВСП і поверхнею об'єкту контролю (ОК) або товщини ДП в діапазоні до 0,5 мм. Зазначимо, що на використаних робочих частотах зазор (повітряний проміжок) між ВСП і поверхнею ОК і шар ДП відповідної товщини впливають на сигнал ВСП однаково. Тому далі будемо використовувати термін «відстроювання від зазору», маючи на увазі і відстроювання від зміни товщини захисного ДП.

Для виконання третьої вимоги необхідно зменшити робочу частоту контролю, щоб на вихідний сигнал ВСП впливали зміни ПЕП в нижніх шарах ОК.

З точки зору вихрострумowego методу кожний елемент поверхні авіаційної конструкції можна представити у вигляді тришарової структури (рис. 2) [19]. Верхній шар – це захисне ДП. Другий шар – антикорозійний плакований шар чистого алюмінію. І третій шар – основний алюмінієвий матеріал, який несе експлуатаційні навантаження і структурні деградаційні зміни матеріалу якого необхідно контролювати з відстроюванням від змінних параметрів, що можуть впливати на результати контролю.

Очевидно, що поставлена задача у повній постановці є достатньо складною і тому для її вирішення доцільно поряд з експериментальними засобами застосувати методи математичного моделювання. Зокрема в роботі [19] аналізували оптимальний вибір робочої частоти контролю залежно від товщини ДП. Досліджували залежність чутливості вихрострумowego методу до зміни ПЕП від робочої частоти контролю для різних значень зазору (товщини ДП). Показано існування оптимальної робочої частоти залежно від товщини ДП, яка зменшується зі збільшенням товщини ДП. Щоб отримати максимальну чутливість до зміни ПЕП під час контролю через шар ДП товщиною 0,5 мм, оптимальна частота повинна мати значення 30 кГц, що втричі менше, ніж робочі частоти раніше розроблених приладів вимірювання ПЕП в АС.

Для зменшення похибки вимірювання ПЕП, пов'язаної з можливою зміною зазору (або товщини ДП), перспективним є використання фазового способу обробки сигналу ВСП [20]. Фазовий структуроскоп (вимірювач ПЕП) складається з двох каналів – вимірювального і опорного. Для збільшення

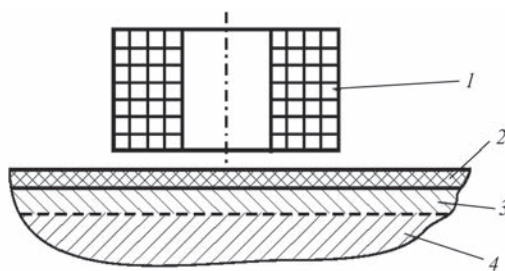


Рис. 2. ВСП над елементом авіаційної конструкції у вигляді 3-шарового електропровідного ОК: 1 – ВСП; 2 – ДП; 3 – плакувальний шар алюмінію; 4 – алюмінієвий сплав

діапазону відстроювання від впливу зміни зазору вихідний сигнал ВСП підсумовують з сигналом компенсації, що фактично призводить до зміщення початку координат в комплексній площині сигналу. Нами використано спосіб динамічної компенсації, коли сигнал компенсації змінюється тільки по одній компоненті залежно від значення ПЕП, що спрощує реалізацію фазового способу і розширює діапазон відстроювання від зміни зазору [21]. В опорному каналі з сигналу генератора формується опорний сигнал для роботи фазового детектора. Для встановлення нульового сигналу на виході фазового детектора при встановленні ВСП на зразок з ПЕП, що

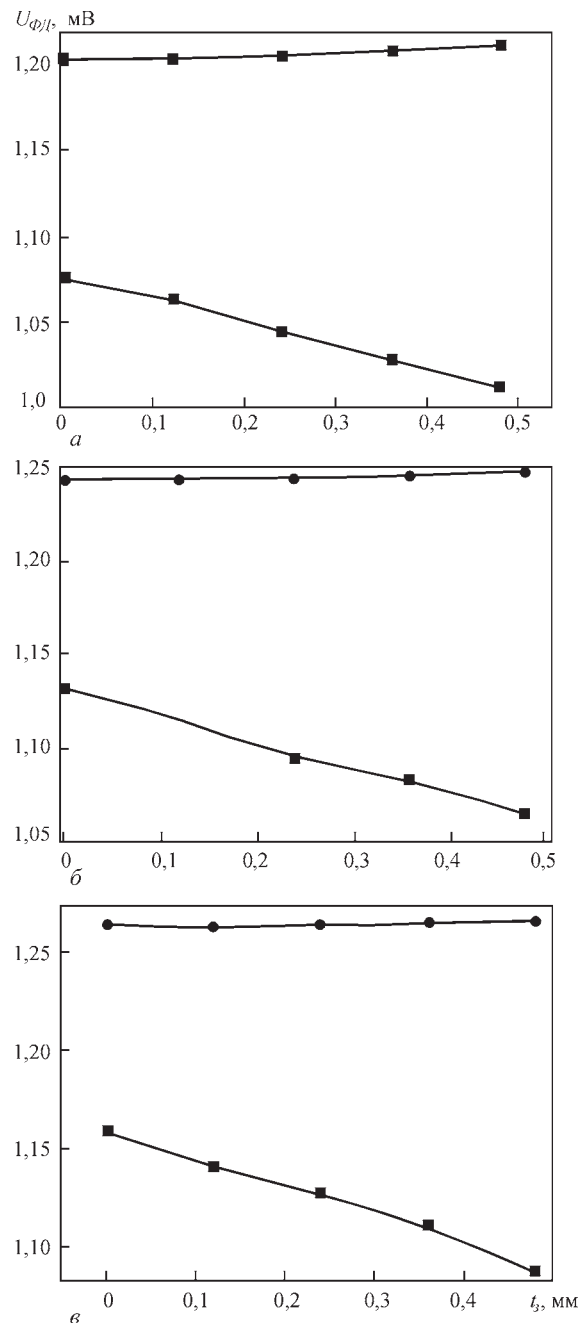


Рис. 3. Залежність напруги на виході фазового детектора U_{ϕ} від зазору t_3 без відстроювання (●) і з відстроюванням (■) для ВСП, розміщеного на зразках матеріалу з ПЕП 14,0 МСм/м (а), 24,7 (б) і 37,1 (в)

відповідає нижнім значенням вимірюваного діапазону, в схему введений фазообертач опорного каналу. Характеристики фазового детектора мають ключове значення для досягнення високої точності вимірювача ПЕП в цілому і його розробка вимагає особливої уваги. В приладі застосовано вдосконалену схему, що дозволило зменшити похибки, пов'язані з перетворенням фази сигналу у часовий інтервал, який використано в якості параметра індикації [22]. На виході фазового детектора виділяється сигнал, пропорційний фазовому зсуву між вимірювальним і опорним сигналами. Для цифрової індикації вимірюваного значення безпосередньо в одиницях ПЕП (МСм/м) у схему вимірювача ПЕП введено блок масштабування і лінеаризації відповідно до нашого винаходу [23]. На рис. 3 наведено залежності сигналу на виході фазового детектора від зазору, які отримано без відстроювання від нього і з реалізацією запропонованого способу вихрострумовевого контролю з відстроюванням від впливу зазору [21]. Результати наведено для початку, середини і кінця діапазону вимірювань ПЕП (14,0; 24,7 і 37,1 МСм/м відповідно). Дані залежності показують, що сигнал на виході фазового детектора не залежить від величини зазору в діапазоні до 0,5 мм, що забезпечує можливість проведення контролю через шар ДП відповідної товщини.

Представлену вище сукупність технічних рішень використано для створення вихрострумовевого структуроскопа-вимірювача ПЕП (рис. 4), який вирішує задачу локального вимірювання питомої ПЕП алюмінієвих сплавів у діапазоні 14,0...37 МСм/м з похибкою до 2 % з відстроюванням від впливу зміни зазору до 0,5 мм.

Вихрострумівий структуроскоп типу ВЕПР-31 (рис. 4) на відміну від раніше створених приладів типу ВЕП-21 і ВЕП-22 [6, 9] має більший діапазон відстроювання від величини (зміни) зазору або товщини лакофарбового покриття і автономне живлення. Крім того, в приладі використано знижену робочу частоту 60 кГц, що дозволяє контролювати зміни структури АС через шар ДП і плакування.



Рис. 4. Вихрострумівий структуроскоп типу ВЕПР-31

Зазначимо, що під час кінцевого вибору робочої частоти враховано також необхідність мати достатню чутливість вимірювання фази вихідного сигналу ВСП, яка зменшується зі зменшенням робочої частоти. В приладі використано локальний ВСП, обмотки якого встановлено на феритовому осердді діаметром 1,1 мм, що дозволяє контролювати авіаційні конструкції з великою кількістю отворів.

Основні технічні характеристики структуроскопа типу ВЕПР-31

1. Діапазон вимірювань ПЕП, МСм/м..... 14,0...37,1.
2. Основна похибка вимірювань в нормальних умовах,% не більше ± 2
3. Допустимий зазор між ВСП і контрольованою поверхнею, мм не більше 0,5
4. Живлення приладу:
 - від мережі 50...60 Гц, напругою 220 В;
 - від вмонтованої акумуляторної батареї
5. Потужність споживання, Вт не більше 1,0
6. Габаритні розміри, мм не більше 60×160×14
7. Маса приладу, кг не більше 1,5

Метрологічні і експлуатаційні характеристики структуроскопа типу ВЕПР-31 дозволяють проводити моніторинг деградаційних змін структури АС в умовах експлуатації, що підтверджено досвідом його використання на ДП «Антонов».

Кореляційні залежності між механічними характеристиками і ПЕП деградованих алюмінієвих сплавів. Показано [24], що процеси деградації АС залежать від навантаженості елементів конструкцій і відображаються у зміні значення ПЕП. Встановлено, що сумісна тривала дія механічних напружень і підвищених температур обумовлює зміни тонкої структури, значні локальні внутрішні напруження і визначає особливу механічну поведінку конструкційних АС типу Д16 і В95. При цьому зростає їх схильність до крихкого руйнування (падає пластичність Δ) і знижуються ХЦТ (ΔK_{th} , ΔK_{fc}), які визначають втомну довговічність (N_p) елементів конструкцій [9], а ПЕП σ зростає. Встановлено, що падінню порогу втоми ΔK_{th} і втомної довговічності N_p зразків деградованих сплавів типу Д16 і В95 у 1,5...2 рази відповідає ріст ПЕП σ на 20...30 % (3...4 МСм/м при похибці вимірювання 2 %) [10].

Результати досліджень на зразках, вирізаних із зон обшивки з різними робочими еквівалентними напруженнями, показали, що за значеннями ПЕП можна оцінювати зміну механічних властивостей матеріалу, ступінь його деградації, порівнюючи їх з даними, отриманими руйнівними методами досліджень (рис. 5). Очевидно, що підвищення значень ПЕП свідчить про деградацію матеріалу в локальних зонах обшивки, що проявляється у вичерпанні пластичності матеріалу (зниженні його відносного видовження) та падінні опору поширенню втомної тріщини (порогу втоми).

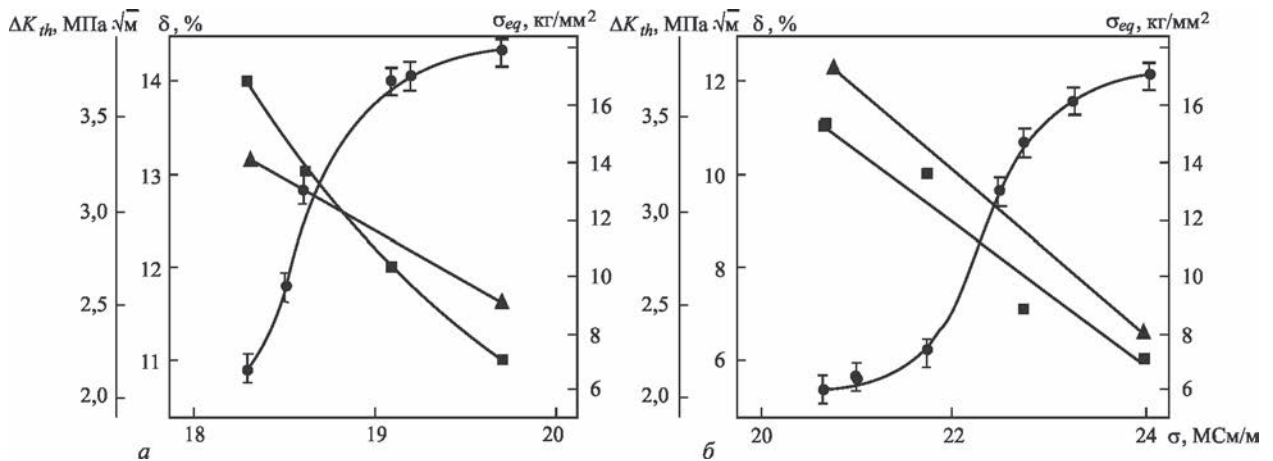


Рис. 5. Залежності між відносним видовженням δ (■), порогом втоми ΔK_{th} (▲), рівнем робочих еквівалентних напружень σ_{eq} (●) та ПЕП (σ) деградованих сплавів Д16АТНВ (а) і В95Т1 (б)

Отримані результати створюють основу для моніторингу деградації конструкційних алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації [25–27]. Важливо, що реалізація цих підходів засобами вихрострумової структуроскопії дозволяє проводити вимірювання ПЕП матеріалів авіаційних конструкцій без зняття лакофарбових покриттів.

Моніторинг деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки.

Розроблені підходи перевіряли під час вимірювання розподілу ПЕП у різних зонах верхньої (сплав В95Т1) і нижньої (сплав Д16АТНВ) обшивки крила літака АН-12, який знаходився в експлуатації з 1966 р. [10, 11]. Вимірювання проводили за допомогою вихрострумового структуроскопа типу ВЕПР-31 (рис. 4). Розподіл значень ПЕП (σ) матеріалу верхньої і нижньої обшивки крила літака типу АН-12 в зоні між 4 і 5 стрингером вздовж крила від кореня крила до його кінця за номерами нервюр наведено на рис. 6. Вка-

зано також значення σ_k (▲) на кінцевому елементі крила. Значення ПЕП поступово зменшуються від кореня крила із збільшенням номера нервюри, що пов'язано зі зменшенням рівня еквівалентних напружень [9, 10]. Видно, що ПЕП на кінцевому елементі крила має найменше значення, що легко пояснити відсутністю у цій зоні навантажень, необхідних для процесу деградації. АС у цій зоні можна умовно вважати таким, який не зазнав деградації. Це дозволяє використати значення ПЕП у кінцевих зонах у випадках, коли інформація про ПЕП матеріалу у стані постачання відсутня, що характерно для літаків тривалої експлуатації. Тому значення σ_k на кінцевому елементі крила запропоновано використовувати в якості порівняльного значення для визначення рівня деградації матеріалу [27].

В якості критерія локальної деградації матеріалу запропоновано використовувати три різні порівняльні параметри, що підтверджується їх розподілом за номерами нервюр на рис. 7 [27]. Можна використовувати різницю $\sigma - \sigma_k$ між ПЕП матеріалу в контрольованій зоні і ПЕП матеріалу кінцевого елемента крила відповідно (рис. 7, а). Значення цього параметра для недеградованого матеріалу відповідає $\sigma - \sigma_k = 0$. Або можна використовувати відношення σ / σ_k (рис. 7, б), яке для недеградованого матеріалу буде відповідати $\sigma / \sigma_k = 1$. Можна також використовувати відношення $(\sigma - \sigma_k) / \sigma_k$, яке для недеградованого матеріалу буде відповідати $(\sigma - \sigma_k) / \sigma_k = 0$ (рис. 7, в).

Запропоновану методологію використано для контролю технічного стану (в тому числі ступеня деградації матеріалу) алюмінієвих лонжеронів лопатей вертольотів. Дослідження лопатей після різного напрацювання (до 1100 год) у зібраному і розшитому станах проводилось на ВАТ «Мотор-Січ». Вимірювання ПЕП, проведені на «відкритих» лонжеронах, виявили критичні місця пошкоджуваності лонжеронів, які відповідають зонам максимального експлуатаційного навантаження.

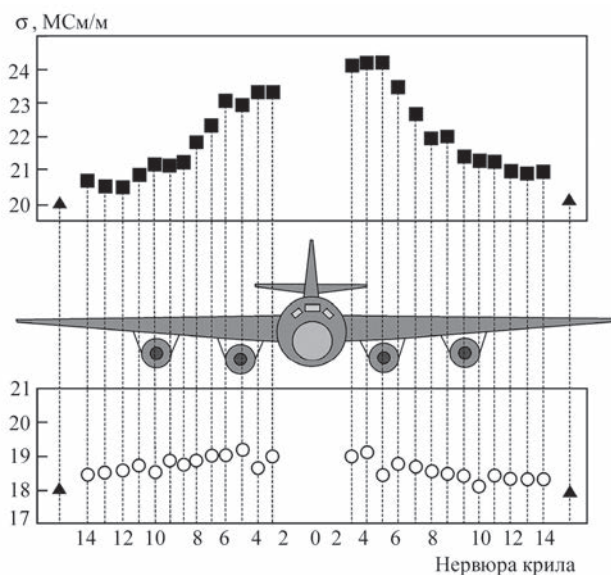


Рис. 6. Розподіл ПЕП (σ) верхньої (■) і нижньої (○) обшивки крила літака АН-12 після багаторічної експлуатації вздовж крила за номерами нервюр (▲ – значення ПЕП σ_k на кінцевому елементі крила)

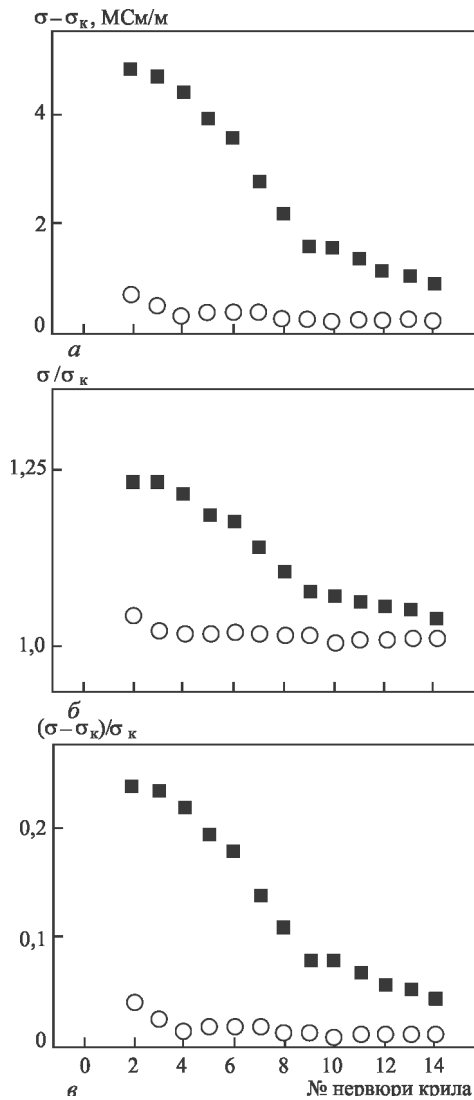


Рис. 7. Розподіл параметрів локальної деградації АС на верхній (■) і нижній (○) обшивках крила залежно від номера нервюри: а – для параметра $\sigma - \sigma_k$; б – для параметра σ/σ_k ; в – для параметра $(\sigma - \sigma_k)/\sigma_k$

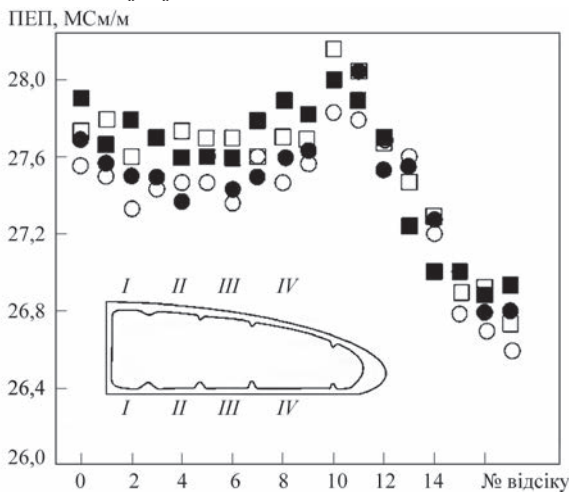


Рис. 8. Розподіл ПЕП на верхній (□ і ○) і нижній (■ і ●) сторонах лонжерона лопаті вертольоту в зонах I (□ і ■) і II (○ і ●)

На рис. 8 видно, що ПЕП має максимальне значення біля кореня лопаті, а мінімальне на її кінці, аналогічно, як у розподілі ПЕП вздовж крила літака

на рис. 6. В зоні відсіків №№ 10, 11 спостерігається ділянка зростання ПЕП, що відповідає зоні максимальної дії напружень розтягу, згину і кручення. Таким чином, за розподілом ПЕП можна знаходити критичні зони максимальної пошкоджуваності лонжеронів лопатей вертольоту.

Представлена методологія оцінки рівня локальної деградації матеріалів авіаційних конструкцій під час довготривалої експлуатації підвищить достовірність прогнозування їх залишкового ресурсу, а також може стати важливою складовою в реалізації концепції безпечної пошкоджуваності.

Висновки

1. Розглянуто проблему деградації алюмінієвих сплавів під час тривалої експлуатації авіаційної техніки. Показано актуальність кореляційних залежностей між фізичними структуро-чутливими параметрами матеріалу, які можна визначити методами НК, і механічними характеристиками матеріалу за циклічного навантаження.

2. Проаналізовано особливості моніторингу деградації авіаційних сплавів на основі безконтактного вимірювання питомої електропровідності. Представлено вихрострумовий структуроскоп-вимірювач питомої електропровідності для контролю пошкоджуваності матеріалів авіаційної техніки в умовах експлуатації.

3. Показано, що підвищення значень питомої електропровідності свідчить про деградацію матеріалу в локальних зонах конструкції, що проявляється у вичерпанні пластичності матеріалу (зниженні його відносного видовження) та падінні опору поширенню втомної тріщини (порогу втоми).

4. Запропоновано методологію вихрострумового моніторингу деградації авіаційних алюмінієвих сплавів в умовах тривалої експлуатації авіаційних конструкцій. Наведено результати ефективного використання розроблених методів і засобів для визначення критичних зон в обшивках літака і лонжеронах лопатей вертольотів із алюмінієвих сплавів.

Список літератури

1. McMaster, R.C., McIntire, P. (1986) *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic Testing (Eddy current, flux leakage and Microwave Nondestructive Testing)*. USA, American Society for NDT.
2. Дорофеев А.Л., Казаманов Ю.Г. (1980) *Электромагнитная дефектоскопия*. Москва, Машиностроение.
3. Учанін В.М. (2006) Вихрострумова дефектоскопія елементів конструкцій. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, 4, 66–73.
4. Dobmann, G., Boller, Ch., Herrmann, H.-G. Altpeter, I. (2014) Micromagnetic and electromagnetic NDT for lifetime management by monitoring ageing of structural materials. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, 9(3–5), 348–359.
5. Estorff, U., Davies, L., Trampus, P. Eds. (1999) NDT methods for monitoring degradation. Proc. of the Joint EC-IAEA Meeting, Petten, European Commission, JRC Institute of Advanced Materials.
6. Остах О.П., Федірко В.М., Учанін В.М. и др. (2007) *Механіка руйнування і міцність матеріалів. Т. 9: Міцність*

і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. Львів, Вид-во «Сполом».

7. Остап О.П., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В. (2006) Деградація матеріалів і втомна міцність тривало експлуатованих авіаконструкцій. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **4**, 5–16.
8. Нестеренко Г.И., Басов В.Н. Нестеренко Б.Г., Петрусенко В.Г. (2006) Влияние длительной эксплуатации самолетов на свойства материалов их конструкций. *Проблемы машиностроения и надежность машин*, **4**, 41–50.
9. Остап О.П., Ківа Д.С., Учанін В.М. та ін. (2013) Діагностика технічного стану авіаконструкцій після довготривалої експлуатації. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **2**, 15–22.
10. Ostash, O., Uchanin, V., Semenets, O. et al. (2018) Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft. *Research in Nondestructive Evaluation*, **29** (3), 156–166. <http://dx.doi.org/10/1080/09349847.2017.1302622>.
11. Uchanin, V., Ostash, O. (2019) Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment. *Proceedia Structural Integrity*, **16**, 192–197.
12. Uchanin, V., Ostash, O., Nardoni, G., Solomakha, R. (2020) Coercive Force Measurements for Structural Health Monitoring. In «The Fundamentals of Structural Integrity and Failure» (Ed. Richard M. Wilcox), New York, Nova Science Publishers.
13. Учанін В.М. Остап О.П. (2019) Оцінювання експлуатаційної деградації конструкційних матеріалів електромагнітними методами неруйнівного контролю. *Матеріали 9-ї Нац. наук.-техн. конф. «Неруйнівний контроль та технічна діагностика»* (Київ, 19–21.11.2019), 35–40.
14. Учанін В.М., Рибачук В.Г., Кулинич Я.П. *Вихрострумний спосіб вимірювання параметрів анізотропії електричної провідності ферромагнітних матеріалів*. України Пат. 138680, МПК G01 N27/90. Опубл. 10.12.2019, Бюл. № 23.
15. Дорофеев А.Л., Ершов П.Е. (1985) *Физические основы электромагнитной структуроскопии*. Новосибирск, Наука.
16. Наумов Н.М., Микляев П.Г. (1974) *Резистометрический неразрушающий контроль алюминиевых деформируемых сплавов*. Москва, Металлургия.
17. Rummel, W.D. (1966) Characterization and evaluation of 2014 aluminum alloy by eddy current conductivity techniques. *Materials Evaluation*, **14**(6), 322–326.
18. Бакунов А.С. (2004) Эволюция аппаратуры для вихретоковой структуроскопии цветных металлов в России. *Контроль. Диагностика*, **4**, 63–64.
19. Назарчук З.Т., Учанін В.М., Кулинич Я.П. (2019) Оптимізація параметрів вихрострумного контролю деградаційних змін питомої електропровідності алюмінієвих сплавів старіючих літаків. *Відбір і обробка інформації*, **47**, 5–11. [doi.org/10.15407/vidbir2019.47.005](http://dx.doi.org/10.15407/vidbir2019.47.005)
20. Учанін В.Н., Макаров Г.Н. (1996) Подавление влияния зазора при бесконтактном измерении удельной электрической проводимости методом вихревых токов. *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*, **4**, 41–45.
21. Учанін В.М. (2012) *Способ вимірювання електропровідності немагнітних матеріалів*. України Пат. № 98206. Опубл. 25.04.2012, Бюл. № 28.
22. Учанін В.М., Черленевський В.В. (2011) *Пристрій вихрострумного контролю параметрів виробів*. України Пат. № 58670. Опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8.
23. Учанін В.М., Макаров Г.М., Черленевський В.В. (2012) *Вихрострумний спосіб вимірювач питомої електропровідності ферромагнітних матеріалів*. України Пат. № 97304. Опубл. 10.01.2012, Бюл. № 2.
24. Остап О.П., Андрейко І.М., Маркашова Л.І. та ін. (2013) Вплив тривалої експлуатації на структуру і фізико-механічні властивості алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95. *Фіз.-хім. механіка матеріалів*, **49**(1), 18–27.
25. Остап О.П., Учанін В.М., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В. (2013) *Вихрострумний спосіб визначення ступеня експлуатаційної деградації конструкційних матеріалів*. України Пат. № 101424, МПК G01N27/90. Опубл. 25.03.2013, Бюл. № 6.
26. Остап О.П., Учанін В.М., Андрейко І.М., Головатюк Ю.В., Ковальчук Л.Б. (2014) *Вихрострумний спосіб ви-*

значення ступеня локальної деградації конструкційних матеріалів під час довготривалої експлуатації. України Пат. 106168, МПК G01N27/90. Опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.

27. Остап О.П., Учанін В.М., Семенець О.І., Головатюк Ю.В., Ковальчук Л.Б., Дереча В.Я. (2017) *Спосіб моніторингу ступеня локальної деградації матеріалів тривало експлуатованих авіаційних конструкцій*. України Пат. 113736, МПК G01N27/90. Опубл. 10.02.2017, Бюл. № 3.

References

1. McMaster, R.C., McIntire, P. (1986) *Nondestructive Testing Handbook. Vol. 4: Electromagnetic testing (Eddy current, flux leakage and microwave nondestructive testing)*. USA, American Society for NDT.
2. Dorofeev, A.L., Kazamanov, Yu.G. (1980) Electromagnetic testing. Moscow, Mashinostroeniye [in Russian].
3. Uchanin, V.M. (2006) Eddy current testing of structure elements. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **4**, 66–73 [in Ukrainian].
4. Dobmann, G., Boller, Ch., Herrmann, H.-G. Altpeter, I. (2014) Micromagnetic and electromagnetic NDT for lifetime management by monitoring ageing of structural materials. *Int. J. Microstructure and Materials Properties*, **9**(3-5), 348–359.
5. Estorff, U., Davies, L., Trampus, P. Eds. (1999) In: *Proc. of the Joint EC-IAEA Meeting on NDT methods for monitoring degradation*, Petten, European Commission, JRC Institute of Advanced Materials.
6. Ostash, O.P., Fedirko, V.M., Uchanin, V.M. et al. (2007) Fracture mechanics and strength of materials. Vol.9: Strength and fatigue life of aircraft materials and structure elements. Lviv, Spolom [in Ukrainian].
7. Ostash, O.P., Andrejko, I.M., Golovatyuk, Yu.V. (2006) Degradation of materials and fatigue strength of aircraft structures in long-term operation. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **4**, 5–16 [in Ukrainian].
8. Nesterenko, G.I., Basov, V.N., Nesterenko, B.G., Petrusenko, V.G. (2006) Influence of long-term service of aircraft on properties of materials of their structures. *Problemy Mashinostroeniya i Nadyozhnost Mashin*, **4**, 41–50 [in Russian].
9. Ostash, O.P., Kiva, D.S., Uchanin, V.M. et al. (2012) Diagnostics of technical condition of aircraft structures after long-term operation. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **2**, 15–22 [in Russian].
10. Ostash, O., Uchanin, V., Semenets, O., Holovatyuk, Y., Kov-alchuk, L., Derecha, V. (2018) Evaluation of aluminium alloys degradation in aging aircraft. *Research in Nondestructive Evaluation*, **29**(3), 156–166. <http://dx.doi.org/10/1080/09349847.2017.1302622>.
11. Uchanin, V., Ostash, O. (2019) Development of electromagnetic NDT methods for structural integrity assessment. *Proceedia Structural Integrity*, **16**, 192–197.
12. Uchanin, V., Ostash, O., Nardoni, G., Solomakha, R. (2020) Coercive force measurements for structural health monitoring. In: *The Fundamentals of Structural Integrity and Failure*. Ed. by Richard M. Wilcox. New York, Nova Science Publishers.
13. Uchanin, V.M., Ostash, O.P. (2019) Evaluation of operational degradation of structural materials by electromagnetic methods of nondestructive testing. In: Proc. of 9th Nat. Sci.-Techn. Conf. on Nondestructive Testing and Technical Diagnostics (Kyiv, 21.11.2019), 35–40 [in Ukrainian].
14. Uchanin, V.M., Rybachuk, V.G., Kulynych, Ya.P. Eddy current method for measurement of parameters of electrical conductivity anisotropy of nonferromagnetic materials. Pat. 138680, Ukraine, Int. Cl. G01 N27/90. Publ. 10.12.2019
15. Dorofeev, A.L., Ershov, P.E. (1985) Physical fundamentals of electromagnetic structuroscopy. Novosibirsk, Nauka [in Russian].
16. Naumov, N.M., Miklyaev, P.G. (1974) Resistometric non-destructive testing of aluminium wrought alloys. Moscow, Metallurgiya [in Russian].

17. Rummel, W.D. (1966) Characterization and evaluation of 2014 aluminum alloy by eddy current conductivity techniques. *Materials Evaluation*, **14**(6), 322–326.
18. Bakunov, A.S. (2004) Evolution of equipment for eddy current structuroscopy of nonferrous metals in Russia. *Kontrol. Diagnostika*, **4**, 63–64 [in Russian].
19. Nazarchuk, Z.T., Uchanin, V.M., Kulynych, Ya.P. (2019) Optimization of eddy current testing parameters of degradation changes in specific conductivity of aluminium alloys of aging aircraft. *Vidbir i Obrobka Informatsii*, **47**, 5–11 [in Ukrainian]. doi.org/10.15407/vidbir2019.47.005
20. Uchanin, V.N., Makarov, G.N. (1996) Suppression of influence of gap in contactless measurement of specific conductivity by eddy current method. *Tekh. Diagnost. i Nerazrush. Kontrol*, **4**, 41–45 [in Russian].
21. Uchanin, V.M. (2012) Method for measurement of electrical conductivity of nonmagnetic materials. Pat. 98206, Ukraine. Publ. 25.04.2012 [in Ukrainian].
22. Uchanin, V.M., Cherlenevskiy, V.V. (2011) Device for eddy current testing of parameters of products. Pat. 58670, Ukraine. Publ. 26.04.2011 [in Ukrainian].
23. Uchanin, V.M., Makarov, G.M., Cherlenevskiy, V.V. (2012) Eddy current specific conductivity meter of nonferromagnetic materials. Pat. 97304, Ukraine. Publ. 10.01.2012 [in Ukrainian].
24. Ostash, O.P., Andrejko, I.M., Markashova, L.I. et al. (2013) Influence of long-term operation on structure and physico-mechanical properties of aluminium alloys of D16 and V95 type. *Fiz.-Khim. Mekhanika Materialiv*, **49**(1), 18–27 [in Ukrainian].
25. Ostash, O.P., Uchanin, V.M., Andrejko, I.M., Golovatyuk, Yu.V. (2013) Eddy current method for determination of operation degradation degree of structural materials. Pat. 101424, Int. Cl. G01N27/90. Publ. 25.03.2013 [in Ukrainian].
26. Ostash, O.P., Uchanin, V.M., Andrejko, I.M., Golovatyuk, Yu.V., Kovalchuk, L.B. Eddy current method of determination of local degradation degree of structural materials during long-term operation. Pat. 106168, Ukraine, Int. Cl. G01N27/90. Publ. 12.05.2014 [in Ukrainian].
27. Ostash, O.P., Uchanin, V.M., Semenets, O.I., Golovatyuk, Yu.V., Kovalchuk, L.B., Derecha, V.Ya. (2017) Method of monitoring of local degradation degree of materials of aircraft structures in long-term operation. Pat. 113736, Ukraine, Int. Cl. G01N27/90. Publ. 10.02.2017 [in Ukrainian].

EDDY CURRENT MONITORING OF ALUMINUM ALLOY DEGRADATION DURING LONG-TERM OPERATION OF AIRCRAFT

V.M. Uchanin¹, O.P. Ostash¹, S.A. Bychkov², O.I. Semenets², V.Ya. Derecha²

¹G.V. Karpenko Physico-Mechanical Institute of NASU. 5 Naukova str., 79060, Lviv, Ukraine.

E-mail: vuchanin@gmail.com

²Antonov Company. 1 Akademika Tupoleva str., 03062, Kyiv, Ukraine. E-mail: info@antonov.com

The monitoring of aluminum alloy degradation is a very important part in aging aircraft maintenance strategy. Our approach is based on the possibility to find the correlation between the material parameters measurable nondestructively and cyclic crack growth resistance characteristics of evaluated material. It was revealed that specific electric conductivity as a structure-sensitive parameter of aluminum alloys measured by eddy current method, can be applied as effective tool for such evaluation. The main advantage of the eddy current method is the possibility to carry out the measurements without direct contact with the inspected surface. From the eddy current method point of view, the aircraft component can be represented by 3 layer object which consists of dielectric protective coating, anticorrosive layer about 0.5 mm thick of pure aluminum cladding and aluminum alloy skin subjected to operational loading. To measure conductivity in this third layer with high lift-off suppression (up to 0.5 mm) a new eddy current conductivity meter of the VEPR-31 type was developed. The correlations between the elongation, fatigue limit and electrical conductivity of degraded D16T and B95T1 alloys for different equivalent stresses were obtained. The EC electrical conductivity measurements carried out in real aircraft repair plant conditions in Antonov-12B aircraft (produced in 1966) after long-term service confirmed the proposed methodology efficiency. Ref. 27, Fig. 8.

Keywords: aircraft, aluminum alloys, degradation, eddy current method, electrical conductivity, fatigue crack growth resistance

Надійшла до редакції 22.01.2021

ЖУРНАЛИ для професіоналів



Видається з 1948 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0005-111X
doi.org/10.37434/as
Передплатний індекс 70031

Видається з 2000 р.
Виходить 12 разів на рік
ISSN 0957-798X
doi.org/10.37434/trwj
Передплатний індекс 21791



Видається з 1989 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 0235-3474
doi.org/10.37434/tdnk
Передплатний індекс 74475



Видається з 1985 р.
Виходить 4 рази на рік
ISSN 2415-8445
doi.org/10.37434/sem
Передплатний індекс 70693

Журнали входять до Переліку наукових фахових видань України

(380-44) 200-8277
journal@paton.kiev.ua
www.patonpublishinghouse.com