

УДК 629.7.036.34

ДОБРИДЕНКО О.М., начальник науково-дослідного управління, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

БОЛОГІН А.С., начальник науково-дослідного відділу, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

КОВЕЛЬ П.П., старший науковий співробітник, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

ЧУСЬ Д.І., старший науковий співробітник

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО РІВНЯ РОЗВИТКУ МЕТОДУ АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СИЛОВИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОНСТРУКЦІЇ ПЛАНЕРА ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

У статті досліджено досвід використання методу акустичної емісії в промисловості та запропоновано шляхи його запровадження в процес експлуатації авіаційної техніки

Ключові слова: акустична емісія, акустично-емісійний метод, засоби реєстрації параметрів акустичної емісії, неруйнівний контроль, ресурс авіаційних конструкцій.

Тривала експлуатація літальних апаратів Повітряних Сил Збройних Сил України в складних умовах приводить до зношення силових елементів конструкції планера і його вузлів, зростання кількості дефектів і пошкоджень, зниження залишкової міцності конструкції планера, а відповідно – до зниження надійності літальних апаратів (ЛА).

За результатами аналізу нормативних обліково-звітних документів щодо технічного стану літальних апаратів військової авіаційної техніки (ВАТ) визначено кількісні дані щодо найбільш поширених в останні роки експлуатації видів небезпечних пошкоджень і дефектів силових елементів конструкції планера, які суттєво впливають на ресурсні показники ЛА та характер їх зміни.

Отримані дані засвідчують, що середньорічна (на один літак) кількість зареєстрованих значних дефектів і пошкоджень силових елементів конструкції планера ЛА, які здійснювали польоти в період 2001...2013 років, щорічно зростає орієнтовно на (6...30)%. Найбільш поширені на силових елементах конструкції планера значні корозійні пошкодження, які в середньому складають біля 50% від загальної кількості зареєстрованих небезпечних дефектів і пошкоджень. Наступними за кількістю ідуть дефекти типу тріщин елементів конструкції – біля 33% від загальної кількості небезпечних дефектів і пошкоджень. Руйнування елементів конструкції планера літака, як наслідок старіння матеріалу та попередньої

появи на них тріщин і корозійних уражень, складають в середньому біля 8%. Відомо, що основними фізико-механічними характеристиками матеріалів авіаційних конструкцій є міцність, жорсткість і твердість, які суттєво залежать від старіння матеріалів, механічних напружень (особливо повторних статичних і вібраційних навантажень), умов експлуатації, наявних дефектів і пошкоджень та інших факторів [1].

Більшість розроблених методів визначення реальних механічних властивостей матеріалу конкретних зразків конструкцій базуються на механічних випробуваннях (метод твердості, метод визначення напруги руйнування, метод вимірювання навантажень і деформацій та інші), які приводять до їх руйнування, а тому неприйнятні в умовах експлуатації ЛА [1,2].

Для перевірочних розрахунків залишкової міцності елементів конструкції планера ЛА в умовах експлуатації можливе використання широко відомого методу кількісної оцінки деформації конструкції, які відповідають певним стадіям процесу руйнування при випробуваннях або експлуатації. Запаси міцності і довговічності в цьому випадку визначаються на базі деформаційних критеріїв руйнування – по граничним навантаженням, місцевим пружним деформаціям, коефіцієнтам інтенсивності напруги і деформацій, за розмірами дефектів типу тріщина [2].

В деформаційні критерії входить указаний комплекс основних характеристик механічних властивостей матеріалу. Крім того, деякі дефекти конструкції планера (в зварних деталях – не провари, гарячі і холодні тріщини; в литих деталях – газові пузири, шлакові включення, тріщини лиття; дефекти термічної обробки і шліфування) по їх впливу на конструкційну міцність розглядаються як еквівалентні тріщини [1,2].

Як відзначалось, найбільш поширеними та небезпечними дефектами і пошкодженнями силових елементів конструкції планера є тріщини (особливо у зварних швах) і корозійні ураження. Тому в процесі довготривалої експлуатації ЛА (в умовах продовження їх призначених строків служби) для оцінювання технічного стану та реального залишкового ресурсу цих конструкцій планера вони підлягають обов'язковому контролю на появу таких дефектів (особливо тріщин) та контролю розвитку їх розмірів до критичного значення, при якому відбувається руйнування деталей. Своєчасне виявлення місць початкової стадії зародження і розвитку мікро і макродефектів металоконструкцій літальних апаратів є важливим завданням в процесі їх експлуатації.

Перспективним напрямком у вирішенні даної проблеми є застосування акустично емісійного (АЕ) методу неруйнівного контролю (НК), який дозволяє у реальному часі відслідковувати характер виникнення і розвитку дефектів у матеріалі конструкції, класифікувати джерела АЕ сигналів та оцінювати технічний стан конструкції в цілому [3,4].

Унікальність методу полягає у тому, що він не вимагає зовнішнього джерела збудження для отримання даних про стан матеріалів і дозволяє отримувати інформацію про дефекти на значній відстані від них. Джерелом акустичних хвиль, які поширюються в матеріалі на значній відстані, служить розвиток дефекту в структурі матеріалу конструкції. Локація акустичного сигналу декількома

датчиками дозволяє визначити місцезнаходження небезпечної ділянки на конструкції, спрогнозувати руйнівне навантаження та її залишковий ресурс. Аналіз параметрів зареєстрованих приладами акустичних сигналів у багатьох випадках дає можливість оцінити небезпеку процесів, які відбуваються у матеріалі, що деформується.

АЕ метод чутливий до виникнення дефектів саме в процесі їх розвитку, класифікуючи їх не за розмірами, як більшість методів НК, а за ступенем небезпечності. Крім того, він дозволяє виявляти дефекти будь-якої орієнтації, слабо чутливий до структури контрольованого матеріалу, не вимагає підготовки поверхні об'єкта контролю та зняття лакофарбового покриття (крім невеликих ділянок в місцях установки датчиків), також дозволяє проводити контроль об'єктів, які частково недоступні для підходу.

АЕ метод дає можливість контролювати процес випромінювання сигналів АЕ: в умовах статичних і динамічних видів навантаження (механічне, гідравлічне, пневматичне, температурне та інше); при корозії, плавленні і кристалізації; при руйнуванні поверхні металів, покриття і плівок; при терті, різанні, шліфуванні; при руйнуванні металевих і не металевих конструкцій.

Без виведення ЛА з експлуатації АЕ метод може забезпечити діагностування й моніторинг ЛА з метою завчасного виявлення можливих небезпечних дефектів силових елементів конструкції планера та не допущення його руйнування.

Шляхом накопичення результатів комплексних експериментальних досліджень авіаційних металоконструкцій з застосуванням методу АЕ може бути сформульована й вирішена задача прогнозування їх руйнівного навантаження та залишкового ресурсу, у тому числі конструкцій із зварними з'єднаннями.

На жаль метод АЕ поки ще не знайшов втілення в процес діагностування силових елементів конструкції літальних апаратів ВАТ, що обумовило вибір АЕ методу для наукових досліджень та розроблення на його основі нових підходів до проблеми оцінювання технічного стану силових елементів конструкції ЛА [3,5].

Розглянемо сучасний рівень розвитку методів АЕ та їх апаратно-програмного забезпечення, а також визначимо можливість його застосування при проведенні контролю й оцінювання фактичного технічного стану силових елементів конструкції планера ЛА.

Основи теорії методів оцінювання стану матеріалів промислових конструкцій, прогнозування їх працездатності шляхом використання акустико емісійних сигналів (методу АЕ) розроблені в середині 1960-х років. Базовим для їх розвитку було питання неруйнівного контролю стану матеріалів металевих конструкцій і забезпечення безпечної їх експлуатації при відпрацюванні технології зварювання металів [3].

Технології і методики НК, засновані на використанні явища АЕ сигналів, які генеруються в процесі руйнування матеріалів, розроблювались на початку 1970-х років. Першочергова увага приділялась рішенню задачі виявлення наявності та визначення місця розвитку дефекту за допомогою АЕ сигналів [3,4].

Практичні роботи по використанню методу АЕ з метою контролю безпечної експлуатації конструкцій стали носити цільовий, планований характер з початку

1980-х років. Створювались високотехнологічні АЕ пристрої і обладнання електроніки, розроблялись технології, засоби і програмне забезпечення для оцінки поточного стану матеріалів діючих конструкцій, прогнозування ресурсу та продовження терміну їх безпечної експлуатації.

На початку 1990-х років в Україні була розроблена і введена в дослідну експлуатацію досконала модель АЕ діагностичної апаратури – система діагностування сімейства ЕМА (Evaluation of Material Ability), широке впровадження якої для оцінювання та прогнозування стану матеріалів у конструкціях на підприємствах України відбувалось лише у 2000-х роках [3].

На даний час апаратурне і програмне забезпечення діагностичних систем постійно удосконалюються, а створені на їх основі мобільні та моніторингові системи працюють в різних галузях української промисловості та на залізничному транспорті. Вони забезпечують визначення координат місць дефектів, що розвиваються, розшифрування інформації про накопичення пошкоджень і розвиток тріщин в конструкційних матеріалах фактично на всіх його стадіях в умовах статичного, циклічного і ударного навантаження, автоматизоване оцінювання стану матеріалу – визначення рівня небезпеки, прогноз руйнівного навантаження та залишкового ресурсу [3].

Велика увага приділена дослідженням впливу зварювання на параметри АЕ у матеріалі [3]. Зокрема, показано, що при наявності в зразку зварного з'єднання останнє є основним джерелом АЕ сигналів. Для зразків із зварними з'єднаннями характерна більша різноманітність одержуваної картини розподілу АЕ, її амплітудних та інших характеристик ніж для зразків без зварювання. А на активність АЕ суттєво впливає ступінь пошкодженості матеріалу, внесеного зварюванням.

Досліджується можливість застосування АЕ методу діагностування до об'єктів, які працюють при високих температурах (елементи конструкції авіаційних двигунів) [3,4]. Встановлено зміну акустичних характеристик матеріалів при підвищенні нагріву робочої частини зразка до температури понад +350°C.

Матеріал без дефектів або з невеликою їх кількістю з точки зору проведення АЕ діагностування менш інформативний при високих температурах і для визначення стану об'єктів контролю потрібна висока чутливість вимірювальної апаратури і спеціальна методика вимірювань.

Для матеріалу об'єктів з концентраторами напружень, зварними з'єднаннями або істотно розвиненими дефектами, АЕ контроль можуть бути проведені з використанням стандартних методик до температури + 500°C. При вищих значеннях температури актуальною проблемою постає забезпечення роботи датчиків АЕ, у зв'язку з чим доцільним є використання спеціальних хвилеводів, що знижують температуру робочої ділянки датчиків. В цілому, об'єкти, які працюють при високих температурах, також можуть бути коректно оцінені за допомогою методу АЕ.

Досвід використання систем діагностування типу ЕМА доводить, що для вирішення задач оцінювання та прогнозування стану матеріалу в різноманітних конструкціях у структуру АЕ апаратури, технологію контролю та побудову програмного забезпечення потрібне впровадження багатоканальних систем з

незалежною роботою окремих каналів та використання багатопільової, стабільно працюючої операційної системи з інтегрованими засобами мережевої комунікації.

Найбільш суттєвою особливістю сучасних розробок в області АЕ контролю стала вимога автоматизації оцінювання стану конструкцій, спрощення інформації про цей стан на виході АЕ системи, представлення її в чисельному вигляді. Замовники вимагають простої, проаналізованої інформації – наскільки безпечним є стан конструкції, при якому навантаженні можна продовжувати експлуатацію, яким є залишковий ресурс. Винятком залишаються координати акустичної активності, оскільки їх знання допомагає при необхідності провести додатковий контроль небезпечних ділянок конструкції та забезпечити їх своєчасний ремонт [3,5].

Технологія автоматичного прогнозу руйнівного навантаження частково уже реалізована в програмному забезпеченні сучасних систем і дозволяє проводити оцінку стану матеріалу промислових виробів оперативного, в режимі реального часу. При цьому активність АЕ в процесі випробувань засвідчує наявність в матеріалі ушкоджень, а кластерний аналіз дозволяє визначити небезпечні місця та розрахувати прогнозовані значення руйнівного навантаження для кожного кластера окремо.

Подібна інтелектуальна система оцінювання стану силових елементів конструкцій, виконана на сучасному рівні, повинна забезпечити такі основні функції:

- виявлення наявності та визначення місця розвитку дефекту за допомогою АЕ сигналів;

- вимірювання, оброблення та подання з заданим ступенем імовірності вихідних даних, необхідних для оцінки несучої здатності конструкцій;

- екстраполяцію отриманих вихідних даних в напрямку прийнятої прогнозованої координати;

- розрахунок несучої здатності і залишкового ресурсу конструкцій за отриманою АЕ інформацією та додатковою інформацією, що характеризує умови експлуатації конструкції;

- оцінку стану конструкції, відпрацювання варіантів наслідків за ступенем небезпеки;

 - рекомендації щодо вибору оптимального варіанту прийняття рішення;

 - відповідно до прийнятого рішення видачу команди про виконання ремонтно-відновлювальних робіт, необхідність часткового або повного припинення функціональної діяльності вузла або конструкції в цілому;

 - передачу інформації про стан конструкції для прийняття рішення по об'єкту.

При досягненні таких значних результатів наукових розробок і практичного впровадження методу АЕ контролю на сьогодні не вирішено ряд суттєвих його теоретичних проблем, що потрібно враховувати при застосуванні цього методу контролю. В окремих випадках отримувані експериментальні дані мають надзвичайно складний, іноді суперечливий характер і не завжди можуть бути описані в рамках відомих хвильових або статистичних закономірностей, тому вимагають подальшого наукового пояснення:

при механічних випробуваннях зразків, вирізаних з суміжних ділянок однієї і тієї ж конструкції, характер виникнення, розподілу і величини сигналів АЕ мають різні параметри;

число подій АЕ, зареєстрованих в зразках з труб, які мають тривале напрацювання, в одних випадках зростає, в інших – зменшується по відношенню до матеріалу;

при однаковому матеріалі і геометрії конструктивних елементів параметри загасання сигналів АЕ відрізняються в кілька разів;

відома гіпотеза про мікротріщини, як основне джерело АЕ на стадіях деформування, що попереджає руйнування, не знайшла експериментального підтвердження, оскільки в більшій частині випробовуваних зразків, крім зразків з аварійних ділянок труб, тріщини не спостерігалися аж до моменту руйнування.

Ці результати досліджень потребують пояснення в рамках єдиної, несуперечливої системи, для чого потрібні нові підходи до опису АЕ як наслідку процесу накопичення пошкоджень і руйнування матеріалів, створення аналітичних методів розрахунку хвильових полів, математичних моделей, що пов'язують пошкодження матеріалу і його акустичні властивості, методики прогнозу стану матеріалу за наявними на момент контролю результатами виміру АЕ.

Об'єктами контролю і діагностування на літальних апаратах методами АЕ можуть бути:

широкий спектр авіаційних матеріалів і процесів формування їх структури; зварні і паяні з'єднання;

елементи і системи високого тиску, технологічні трубопроводи;

силові компоненти конструкції планера літальних апаратів;

технологічні процеси обробки авіаційних матеріалів в процесі виготовлення і ремонту ЛА.

Слід зазначити, що діагностування елементів конструкції планера при експлуатації (в умовах навколишнього середовища), у порівнянні з випробуваннями зразків в лабораторних умовах, має особливості, пов'язані з низкою факторів:

- висока зашумленість сигналу АЕ від багатьох елементів конструкції планера, бортового обладнання і зовнішніх завад, що вимагає застосування високочутливої багатоканальної апаратури з можливостями частотної і параметричної фільтрації сигналів АЕ;

- неможливість проведення повного циклу навантажування (від повної відсутності навантаження до руйнування об'єкта), що потребує застосування технології прогнозування руйнівного навантаження при роботі матеріалу в пружній області або при постійному рівні поточного навантаження;

- неповна інформація про матеріали контрольованих конструкцій, що вимагає створення універсальних алгоритмів прогнозування руйнівного навантаження, орієнтованих не так на матеріал, як на ушкодженість конструкції;

- обмеження на строки проведення діагностування, що потребує створення алгоритмів автоматизованої настройки АЕ систем та їх ефективної корекції в реальному часі.

Робота по створенню автоматизованої системи НК діагностування технічного стану ЛА, заснованої на застосуванні АЕ, яка дозволить реалізувати повний контроль елементів конструкції планера і отримання інформації з важкодоступних місць, крім монтажу обладнання, установки датчиків і прокладки комунікацій, включає і створення й налагодження програмної архітектури системи та алгоритмів оцінки стану об'єктів контролю, вибір і розробку засобів і способів обміну даними, що забезпечуватимуть безперервний моніторинг, їх тестування, коригування за результатами дослідної експлуатації та введення системи в штатну експлуатацію.

Висновки.

Дослідження щодо методу АЕ діагностування і контролю встановило його ефективність при пошуку дефектів та оцінюванні технічного стану зразків і конструкцій з широкого класу матеріалів в лабораторних і промислових експлуатаційних умовах, в широкому діапазоні температур і за різних умов зовнішнього середовища.

Розроблена технологія неруйнівного контролю, яка дозволяє ефективно використовувати метод АЕ в умовах виробництва і експлуатації силових конструкцій різного призначення.

Вивчено теоретичні питання прогнозування руйнування на основі даних АЕ контролю та отримано аналітичні залежності для алгоритмів самонавчання при виконанні процедури діагностування. Виконані дослідження дозволили прогнозувати руйнівне навантаження матеріалу на ранніх стадіях руйнування.

Досліджено взаємозв'язок АЕ з накопиченням ушкоджень в матеріалі під час деформування в процесі експлуатації. На його основі розроблено методику оцінки ушкодженості і визначення залишкового ресурсу конструкцій з експлуатаційним напруженням за даними АЕ контролю.

Впровадження в промисловість розробок в області АЕ при пошуку та оцінюванні небезпеки існуючих і виникаючих в процесі експлуатації дефектів для широкого класу матеріалів і конструкцій дозволило створити систему безперервного моніторингу технічного стану конструкцій в процесі їх експлуатації з визначенням руйнівного навантаження та залишкового ресурсу матеріалу в реальному часі.

Таким чином, проведений аналіз досягнутого на сьогодні рівня розвитку й ефективності застосування АЕ методу контролю для діагностування технічного стану різноманітних силових металевих конструкцій на підприємствах промисловості і на залізничному транспорті України приводить до висновку про доцільність його застосування для діагностування силових елементів конструкції планера військових літальних апаратів.

ЛИТЕРАТУРА

1. Остап О.П., Федірко В.М., Учанін В.М. Механіка руйнування і міцність матеріалів. Том 9. Міцність і довговічність авіаційних матеріалів та елементів конструкцій. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 1068 с.
2. Когаєв В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. – М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.

3. Патон Б.Е., и др. Опыт ИЭС им. Е.О.Патона НАН Украины в области акустико-эмиссионного контроля. // Техническая диагностика и неразрушающий контроль, №1, 2012. С. 7-22.
4. Ковель П.П. Диссертация к.т.н. Контроль технического состояния авиационных конструкций с использованием сигналов акустической эмиссии, возникающих на режиме специально организованных автоколебаний. – К.: КВВАИУ, 1985. – 159 с.
5. Пащенко С.В., Хильченко М.Ф., Юхачов В.В. Методологія збільшення ресурсів авіаційної техніки. // Збірник наукових праць ДНДІА, № 8(15), 2012. С. 161-166.

Надійшла до редакції 02.10.2014