3.10
5.21

Roncsolásmentes vizsgálatok szerepe repülőgépek biztonságában

Tárgyszavak: roncsolásmentes vizsgálatok; tűrés; biztonság; fáradási repedések; repülőgép; karbantartási költség; USA.

A tűrhető hibák filozófiája, amelyet az USA Air Force (légierője) és több USA-beli repülőgépgyár közösen dolgozott ki az 1960-as és 1970-es években, sikeres volt az azóta gyártott repülőgépek fáradási hibáinak kezelésében. Ezt a filozófiát a repülőgépek teljes élettartama során – a tervezéstől az üzemszerű használatig – alkalmazzák. Az élettartam minden fázisában a roncsolásmentes vizsgálatoknak kritikus szerepe van abban, hogy a repedések tűrhető mértékét meghatározzák, ezáltal hatással vannak a karbantartás költségeire és hatékonyságára.

A tűrhető hibák filozófiája

Az USA Védelmi Minisztériuma által kiadott irányelvek szerint feltételezni kell, hogy repedésszerű sérülések léteznek a repülőgépek minden kritikus elemében már akkor, amikor azokat használatba veszik. Feltételezni kell továbbá, hogy repedések a leginkább igénybe vett területen és kritikus irányban alakulnak ki. Ezek a repedések azonban bizonyos ideig – normális üzemi feltételek mellett – nem növekednek meg olyan mértékben, hogy törést okozzanak.

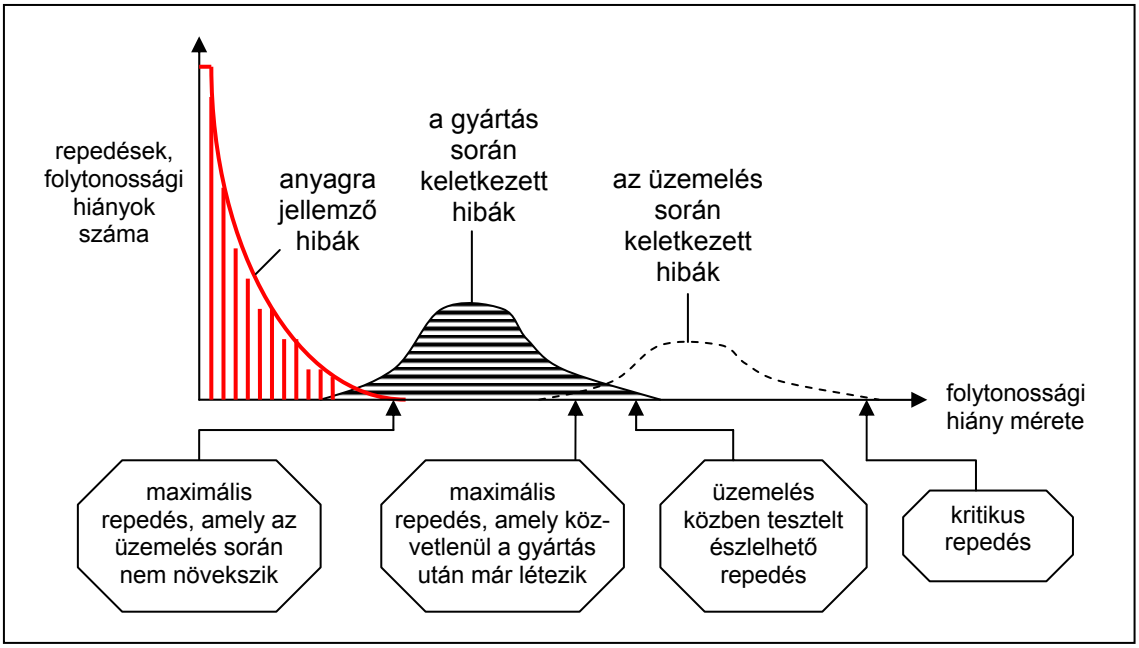
A hibákkal kapcsolatban három területen van szükség intézkedésekre:

- A tervezés során biztosítani kell, hogy az üzem közben fellépő feszültségek alacsonyak legyenek, ne legyenek olyan helyek, ahol feszültségcsúcsok alakulhatnak ki.
- Olyan anyagokat kell kiválasztani, amelyek ellenállnak repedések képződésének.

- Olyan roncsolásmentes eljárásokat kell kidolgozni és alkalmazni a repülőgép használatbavételének engedélyezése és rendszeresen az üzemeltetés során, amelyekkel észlelni lehet a repedéseket. Minél kisebbek a kezdeti repedések, annál hosszabb idő alatt fejlődnek a fáradási repedések nem tűrhető mértékűre.

A hibák típusai

A szerkezeti elemekben háromféle hiba fordul elő, amelyekre nagyságuk és eloszlásuk jellemző (*1. ábra*).



1. ábra A hibák száma és valószínűségi eloszlása

- Az első típus az anyag belső folytonossági hiánya (diszkontinuitása), ami a gyártási folyamat (ötvözés, hőkezelés, alakítás stb.) eredménye, és porozitás, mikrorepedések, zárványok és felületi hibák formájában jelentkezik. Ezek a hibák általában kisebbek, mint a roncsolásmentes vizsgálati eljárások észlelési határa. A tervezés során kell olyan anyagokat választani, amelyekben ezek a folytonossági hiányok csak minimális mértékben fordulnak elő és nem növekednek a tervezett élettartam során jelentős mértékben.
- A második típusba azokat a folytonossági hiányokat kell sorolni, amelyek a gyártás (gépi megmunkálás, szerelés stb.) során kelet-

keznek. Ezeknek jelentős része elég nagy ahhoz, hogy roncsolásmentes eljárásokkal felfedezhető legyen és hogy jelentősen megnövekedjenek az üzemelés során. Előírnak olyan tűréseket, amelyeket a gyártás során kell betartani és a kritikus részek roncsolásmentes vizsgálatával lehet ellenőrizni. Megkülönböztetett figyelmet kell fordítani azokra a kisméretű folytonossági hiányokra, amelyek a gyártást követően nem észlelhetők, tehát akkor is fennállnak, amikor a repülőgépet használatba veszik. Jelölésük a_i. Az ilyen repedés a használat során az anyag fáradása következtében növekszik és ennek figyelembevételével lehet meghatározni a megengedett élettartamot vagy a vizsgálatok előírt időközeit.

- A használat során keletkezett folytonossági hiányok képezik a harmadik csoportot. Ezek a repedések fáradás, korrózió vagy külső hatások (ütés) következtében keletkeznek és az üzemelés alatt tovább növekednek. Ezek jelölése a_s. ($a_s > a_i$). A tűrési előírások megkövetelik, hogy az ilyen repedések ne növekedjenek kritikus méretűre a tervezett élettartam vagy a vizsgálatok terv szerinti időközei során. Az észlelhető repedés nagysága nagyobb, mint az előző két típus esetében, mivel a vizsgálatokat összeszerelt, bevonatolt szerkezeten végzik, ami csökkenti minden roncsolásmentes technika hatékonyságát.

A megengedhető hibanagyság

Az egyedi repedések nagyságára nem lehet alapozni a tűrési filozófiát, mivel az egyedi méréseket számos tényező befolyásolja bármely roncsolásmentes eljárás esetében is. Ennek ellenére meg kell határozni valamilyen tűrést, amely alapján használati engedély adható ki. Ezért meghatároztak egy repedésnagyságot az észlelés valószínűsége és a megbízhatósági határ figyelembevételével. Az észlelés valószínűsége a repedés hosszától függ. Adott repedéshosszra vonatkozó értéke a pontos mérések arányától, a szerkezeti elemek számától, a környezeti feltételektől és a vizsgálatot végző szakembertől függ. A meghatározáshoz nagyszámú vizsgálat eredményének statisztikai elemzése szükséges.

Az észlelés valószínűségének meghatározása során tekintetbe kell venni a vizsgálatok elvégzésének külső feltételeit. Ezeket veszi számításba a megbízhatósági korlát. Természetesen nem lehetséges sem az észlelés valószínűségét, sem a megbízhatóságot 100%-osan megkövetelni, de mind a két értéket olyan nagyra kell megállapítani, amilyet a

gazdasági feltételek megengednek. A tűrési követelmények az észlelés 90%-os valószínűségét és 95%-os megbízhatóságát írják elő.

Az elemek kategorizálása

Nehéz dolog meghatározni a_i és a_s értékeit az észlelési valószínűség és megbízhatóság figyelembevételével. A repülőgépekre vonatkozó előírások három kategóriába sorolják azokat a szerkezeti elemeket, amelyeknél ellenőrizni kell a repedéseket és a geometriai méretektől függően határozzák meg a megengedhető kezdeti repedések méretét.

Az első kategória, amelynek megnevezése „lassan növekvő repedések”, olyan elemeket tartalmaz, amelyek beépítve nem, csak kiszerelés után vizsgálhatók.

A második kategória „törésbiztos, több terhelési utas” elemeket foglal magába. Ez azt jelenti, hogy több egymáshoz kapcsolt elem hordja a terhelést, így a repedés az egyik elemről átterjedhet a másikra.

A harmadik kategóriát „törésbiztos, repedést megállító” szerkezeti elemnek lehet nevezni. A terhelést ebben az esetben is több elem veszi fel, de közöttük olyan elemek vannak, amelyek megakadályozzák, hogy a repedések az egyik elemről a másikra átterjedjenek. A kezdeti repedések méretét kézikönyvek tartalmazzák.

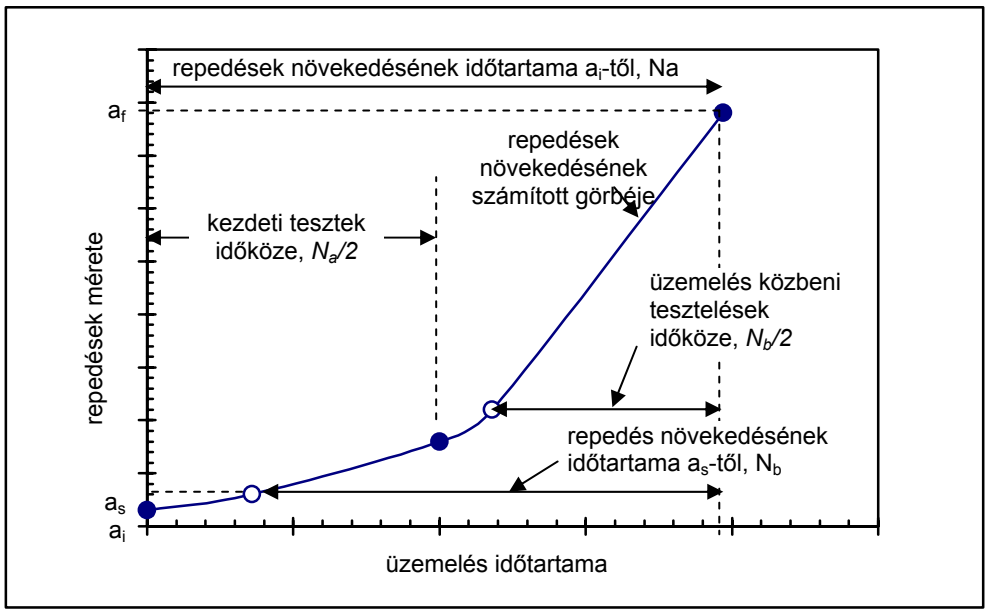
Másodlagos repedésnek azokat nevezik, amelyek az elsődleges repedésekkel azonos terhelés alatt, ugyanazon a területen képződnek, mint az elsődlegesek. Régebben a másodlagos repedéseket a kezdeti anyaghibákra vezették vissza és az elsődleges repedésektől elkülönítve vizsgálták. A jelenlegi ismeretek szerint azonban a másodlagos repedések kialakulása az anyag fáradásának jele és lényegesen csökkenti az anyag szilárdságát.

A minőség-ellenőrzés problémái

A katonai repülőgépek gyártásában igen sok vizsgálatot végeznek a kritikus szerkezeti elemek törésével kapcsolatban. A minőség-ellenőrzés és a problémák visszavezethetősége alaphibákra szigorú követelmény, az üzemelés során az ellenőrző vizsgálatokat pedig gyakrabban végzik. A roncsolásmentes vizsgálatok jelentős szerepet játszanak a repülőgépek üzemeltetési költségeiben.

Valamely szerkezeti elem kritikus helyén, adott terhelés mellett a fáradási repedések növekedésének elemzése alapján lehet meghatározni a ellenőrző vizsgálatok időközeit. Ahogy a *2. ábrán* látható, ha a repedés a_s-ről a_f-re (törési méret) N_a idő alatt növekszik, a vizsgálatok időközeit

$N_a/2$-ben kell meghatározni. (Azért 2 az osztó, mivel ez az előírt biztonsági tényező.) Ha N_a nagyobb, mint a tervezett használati idő, akkor nincs szükség az első vizsgálat után további teszteket végezni. Más esetben az élettartam során négyszer is el kell végezni bizonyos szerkezeti elemek roncsolásmentes vizsgálatát.



2. ábra Az üzem közbeni tesztek időközeinek meghatározása

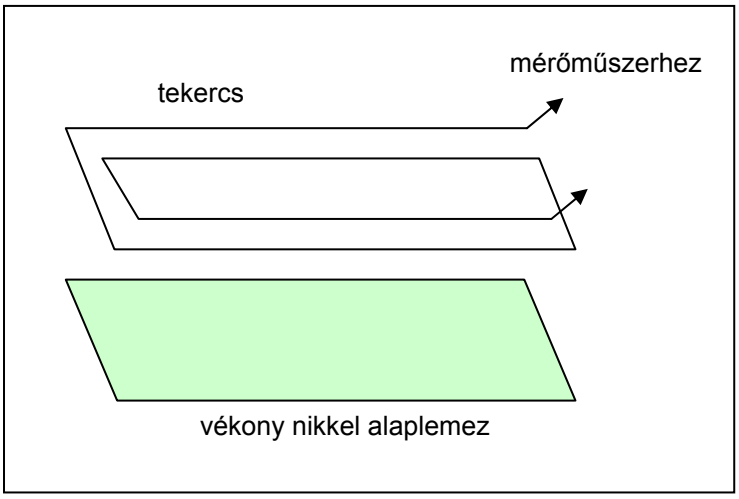
A roncsolásmentes vizsgálatoknak a gyártási minőségbiztosításban is fontos szerepe van. Ilyen eljárással meg lehet határozni azt a maximális repedésméretet, amely a gyártott elemekben előfordulhat. A vizsgálati eljárás pontosságának növelésével a tesztek számát radikálisan le lehet csökkenteni, miáltal az üzemeltetési költségek is jelentősen csökkenthetők.

Roncsolásmentes mérési eljárások

Szerkezeti elemekben levő folytonossági hiányok észlelése érdekében kutatásokat végeztek mágnesesen létrehozott, irányított hullámok alkalmazásával kapcsolatban. Az ilyen vizsgálati technológia könnyen használható és olcsóbb, mint a hagyományos ultrahangos és kóboráramos eljárás. A műszer tartós, nem törékeny összehasonlítva a piezoelektromos kristályokkal.

A *3. ábra* mutatja a mágneses irányított hullámok érzékelésének elvét. A szenzor egy vékony nikkelfóliából és nyomtatott áramkörbe épített nikkelhuzalból készített két tekercsből áll, amely a nikkelfólián van. A

szenzor ragasztóval a szerkezeti elem felületéhez van kötve. A nikkel alaplap mágnesesen kondicionált. Amikor rádiófrekvenciás villamos áramot bocsátanak a műszerbe, a tekercsek vízszintesen irányított hullámokat gerjesztenek a nikkelfóliában. A hullámok frekvenciája 30–150 kHz. A hullámok a szerkezetben terjednek és visszaverődnek a szerkezeti elem határfelületein vagy a folytonossági hiányokon. A visszavert hullámokat a szenzor érzékeli.



3. ábra Irányított mágneses hullámokon alapuló műszer folytonossági hiányok érzékelésére

A periodikusan gyűjtött vizsgálati adatok jól összehasonlíthatók, mivel az érzékelő a szerkezeti elem felületéhez állandón rögzítve van. Így kimutatható az idővel bekövetkező változások trendje. Megfelelő vizsgálati módszerrel a hibák helye is meghatározható.

A vizsgálati módszer hatékonyságának előfeltétele, hogy a nikkelfólia változatlan helyzetben maradjon rögzítve a vizsgálandó szerkezeti elemhez az egész időszakban.

Felmerül az a probléma, hogy az eljárás festett felületen alkalmazható-e vagy a szenzor festékkel bevonható-e. A tapasztalat szerint a szenzor alkalmazható festett felületen is, ha a festék jól köt a szerkezeti elemhez. A festékkel való utólagos bevonás sem zavarja a műszer működését. Az eljárás észlelni tudja a szerkezeti elem méretének változását, a festékréteg végét, de nem zavarja a vizsgálat megbízhatóságát, ha ezek időben változatlanok. Az eljárás érzékenységét befolyásolja a felület érdessége, a méhsejtszerű szerkezet és a bitumenes bevonat.

A szerkezeti elemek felületéhez rögzített kóboráramos szenzorok megbízhatóan használhatók fáradási repedések észlelésére. A vándorló tekercses magnetométerek rendszere olcsó, megbízható és tartós. Mivel

nem jelent jelentős költségtöbbletet, felszerelhető sok szerkezeti elemre. Ilyen eszközökkel kedvező tapasztalatokat szereztek F-18-as katonai repülőgépek, 727-es utasszállító gépek ellenőrzése során. Az erősen igénybe vett felületeken elhelyezett szenzorokkal érzékelhetők 50 μm-nél kisebb repedések, megfigyelhető ezek növekedése. Kimutatható az acél repedéseket megelőző kifáradása is.

(Dr. Garai Tamás)

Ball, D. L.: The role of nondestructive testing in aircraft damage tolerance. = Materials Evaluation, 61. k. 7. sz. 2003. p. 814–818.

Goldfine, N.; Zilberstein, V.; stb.: Eddy current sensor networks for aircraft fatigue monitoring. = Materials Evaluation, 61. k. 7. sz. 2003. p. 652–659.

Light, G. M.: Kwun, H.; stb.: Health monitoring for aircraft structures. = Materials Evaluation, 61. k. 7. sz. 2003. p. 844–847.

EGYÉB IRODALOM

Aircraft maintenance: Preparation in 3D. (Repülőgép-karbantartás: előkészítés három dimenzióban.) = Fraunhofer Magazine, 2003. 1/2. sz. p. 22–26.
Aircraft Maintenance: training. (Repülőgép-karbantartás oktatása.) = Flying Safety, 59. k. 8. sz. 2003. p. 12–13.
Reducing aircraft maintenance costs for the U.S. Navy. (Repülőgép-karbantartási költségek csökkentése az USA-haderőnél.) = IIE Solutions, 33. k. 4. sz. 2001. p. 10.
Avdelidis, N. P.; Hawtin, B. C.; Almond, D. P.: Transient thermography in the assessment of defects of aircraft composites. (Tranziens termográfia repülőgép kompozitpanelek hibameghatározására.) = NDT & E International, 36. k. 6. sz. 2003. szept. p. 433–439.
Schmidt, R. A.; Bending, J. M. stb.: Rapid ultrasonic inspection of ageing aircraft. (Gyors ultrahangos felülvizsgálat öregedő repülőgépekhez.) = Insight, 45. k. 3. sz. 2003. p. 174–177.