

Bozóki János,¹ Kavas László²

Katonai légi jármű-alkatrész örvényáramos anyagvizsgálatának lehetőségei és tapasztalatai

Napjainkig a Magyar Honvédség légierijének kötelékében számos új, a kor technikai színvonalán álló haditechnikai eszköz állt hadrendbe (JAS-39 EBS HU Gripen harcászati repülőgép, Airbus A319 szállító repülőgépek, Airbus H145M helikopterváltozatok). Ezek megjelenésével együtt jár a korszerű üzemeltetési és diagnosztikai rendszerek alkalmazása is, amelyek egyik speciális eleme a roncsolásmentes anyagvizsgálat. Az üzemeltetésben részt vevő szakemberek felkészültségének szintje a roncsolásmentes vizsgálatok hatékony alkalmazásának egyik legfőbb tényezője. E publikáció egy, a katonai légi járművek üzemeltetése során felhasználható, nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező, örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer alkalmazási lehetőségét, sajátosságait és az alkalmazó ezen a téren szerzett tapasztalatait mutatja be.

Kulcsszavak: örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálat, légi járművek üzemeltetése, harcászati repülőgép, szállító repülőgép, helikopter

Possibilities and Experiences of Eddy Current Testing of Military Aircraft Components

To date, several high-tech military equipment (JAS-39 EBS HU Gripen combat aircraft, Airbus A319 transport aircraft, Eurocopter H145M helicopter variants) have been deployed in the Hungarian Defence Forces. With their deployment, a need has emerged to apply modern operating and diagnostic systems, one of them being non-destructive testing (NDT). One of the many key factors of applying successful non-destructive testing is the level of competence of the personnel involved. This publication is about to describe the applicability and characteristics, as well as the experience gained while applying an eddy current testing method with high spatial resolution used during the operation of military aircraft.

Keywords: eddy current non-destructive material testing, aircraft operation, combat aircraft, transport aircraft, helicopter

¹ MH Légi jármű Javitóüzem, parancsnok, e-mail: leju.pk@mil.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-1897-7392>

² Nemzeti Közszerződési Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztoképző Kar Repülő Sárkány-hajtómű Tanszék, egyetemi docens, e-mail: kavas.laszlo@uni-nke.hu, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7375-3527>

1. Bevezetés

A katonai repülőeszközök üzemeltetésében, a mindennapi gyakorló-kiképző repülések mellett gyakori az országhatáron kívüli, műveleti területeken való megjelenés is. E feladatok többsége a szállító repülőgépeket (AN-26, és A319 típusok) érinti, de a NATO-szövetségi feladatok, közös harcászati gyakorlatok során, a rendszerben álló harcászati repülőgépeket és szállító helikoptereket is bevetik. Az ilyen speciális felhasználási módok szükségessé tették már a korábbi időszakban is az akkor üzemeltetett típusokra alkalmazható háborús sérülések javítási képesség megteremtését és folyamatos fenntartását. A napjainkban megvalósuló haderőfejlesztési program számos korszerű, sokoldalúan alkalmazható, nagy harcértékkel rendelkező és újszerű szerkezeti megoldásokat, építőanyagokat tartalmazó légi jármű-típust állított hadrendbe a Magyar Honvédségben. Az új repülőgépek, helikopterek beszerzése, rendszerbe állítása nem csak az üzemeltető alakulatok számára jelent feladatrendszer-változást, az ezen eszközök javítására, időszakos karbantartására felkészített szervezetnek nem mellékes feladatként a sérülések javítás elemeit is testre, illetve szerkezeti technológiai szintre kell szabnia. A korszerű szerkezeti anyagokhoz többek között illeszteni kell egy hibafeltáró alrendszert is. Az idesorolható különböző eljárásokra a megoldandó feladatok széles skálája, valamint az egyes módszerek alkalmazhatóságának korlátai miatt van szükség. Az eltérő fizikai elven működő roncsolásmentes vizsgálati módszerek nem egyformán használhatók a hibák detektálására vagy anyagtulajdonságok jellemzésére, ezért azok teljesítőképességét, alkalmazási lehetőségeit mindig szem előtt kell tartani. A megoldandó feladat tisztázását követően a leginkább megfelelő roncsolásmentes vizsgálati eljárást vagy ezek kombinációit szükséges alkalmazni. A használandó módszer nagymértékben függ a vizsgálati tárgyakban várható folytonossági hiány típusától, méretétől, irányítottságától, a keresett eltérés pozíciójától, felületi mélységi helyzetétől. A publikációban egy, a katonai légi járművek üzemeltetése során felhasználható, nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező, örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer (ET)³ alkalmazási lehetőségét, sajátosságait és az alkalmazó ezen a téren szerzett tapasztalatait mutatja be egy repülőgépre felszerelhető rakétaindító berendezés (NMML)⁴ áramvonalazó lemezének vizsgálatán keresztül.

2. Egy vizsgálandó munkadarab bemutatása

Az NMML rakétaindító berendezés áramvonalazó lemeze kovácsolt elemek összehesztéseiből álló alumíniumszerkezet (1. és 2. ábra). Nagy sebességű repülésnél a kialakításából adódóan csökkenti a repülőgép légellenállását, és megakadályozza a hangebesség felett kialakuló káros lökéshullámok létrejöttét.

³ ET: Eddy Current Test, örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer.

⁴ NMML: NATO Multi Missile Launcher, rakétaindító berendezés.



1. ábra

JAS-39 GRIPEN repülőgépre függesztett NMML rakétaindító berendezés. Forrás: Peták György – Szabó József: *A Gripen*. Budapest, Petit Real Könyvkiadó, 2003. 43.

A JAS-39 GRIPEN harcászati vadászbombázó repülőgép sebessége 2,0 Mach nagy magasságon, 1,2 Mach tengerszinten. A Mach-szám (M)⁵ egy dimenziómentes mennyiség, egy objektum haladási sebességének és az áramló közeg helyi hangsebességének hányadosa.⁶

$$M = \frac{V_i}{a}$$

- V_i : a légi jármű levegőhöz viszonyított, valóságos repülési sebessége [m/s]
- a : helyi hangsebesség [m/s]

A nemzetközi egyezményes légkör (ISA)⁷ adatai szerint 1000 m magasságban a hang terjedési sebessége $a = 336,434$ m/s, és $M = 1,2$ esetén a repülőgép repülési sebessége $V_i = 1453$ km/h.

A Gripen +9 és -3 g értékű túlterhelés elviselésére képes. A „g” terhelési többes egy mértékegység nélküli szám, amely megmutatja, hogy a repülőgépre, annak szerkezeti elemeire vagy akár annak utasaira, a saját súlyukat hányszorosan meghaladó (terhelő) erő hat. A terhelési többes felhasználható a repülőgép különböző repülési manőverei, repülési fázisai során ébredő terhelések általános jellemzésére. A terhelések tárgyalásakor természetesen a hőmérséklet-változásokról sem szabad megfeledkezni, hiszen 10 000 méter magasságban közel -50 °C a hőmérséklet, míg a kifutópályán +40 °C is lehetséges.⁸

⁵ M : Mach-szám, egy dimenziómentes mennyiség.

⁶ Robert W. Fox – Alan T. McDonald: *Introduction to Fluid Mechanics*. USA, John Wiley & Sons, 1994. 439–440.

⁷ ISA: International Standard Atmosphere, nemzetközi egyezményes légkör.

⁸ Kavás László: *Harcászati repülőgép kiválasztásának módszere, gazdasági hatékonysági mutatók alapján, kis létszámú haderő légierőjének korszerűsítésére*. PhD-értekezés, Budapest, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2009. 23–31.



2. ábra

NMML rakétaindító berendezés áramvonalazó lemeze. Forrás: Bozóki János felvétele

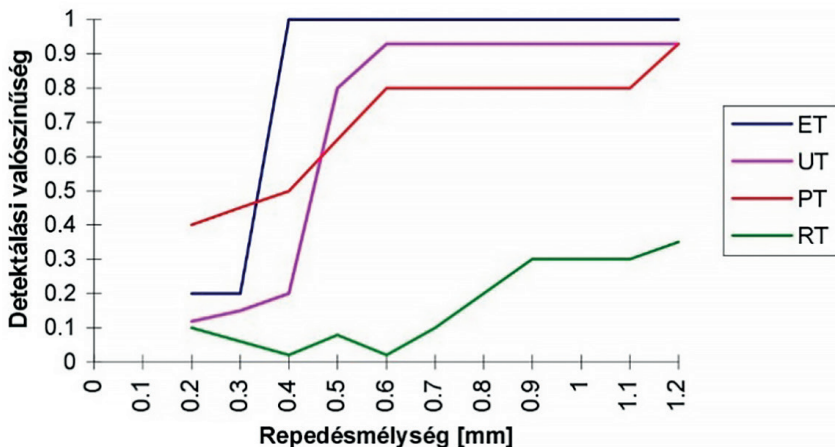
Az áramvonalazó lemez fő igénybevételét a légerőkből létrejövő erőhatás hozza létre. Nagy magasságon, nagy sebességű repülésnél a repülőgép szerkezetén nagymértékű hőmérséklet-ingadozás jön létre. Ezáltal csökkennek az áramvonalazó lemez szilárdsági és merevségi jellemzői. Járulékos feszültségek keletkeznek, amelyek a külső terhelésekből származó feszültségekkel összegződve a stabilitás elvesztését vagy az áramvonalazó lemezen kialakuló repedéseket és egyéb folytonossági hiányokat eredményezhetnek. A feszültséggyűjtő helyeken lassú alakváltozás keletkezik, amely az áramvonalazó lemez roncsolódását idézheti elő.

3. A roncsolásmentes anyagvizsgálat vizsgálati módszerének kiválasztása

Az elsődleges szempont természetesen az, hogy az adott eljárással érzékelni lehessen a vizsgálni kívánt anyagtulajdonságot. Például örvényáramos mérést csak elektromosan vezető anyagokon lehet végezni, és ezeken is csak olyan paraméterek határozhatók meg, amelyek az örvényáramok erősségét, valamint eloszlását befolyásolják.⁹ A következő kérdés az, hogy a szóba jöhető eljárások közül melyik biztosítja a megkövetelt érzékenységet és pontosságot (3. ábra). Belső anyaghibákat például sokkal könnyebben fel lehet deríteni

⁹ Hugo L. Libby: *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. New York, John Wiley & Sons Inc, 1971. 52–53.

ultrahanggal, mint örvényáramokkal, felületi repedéseknél viszont éppen fordított a helyzet.¹⁰ Az érzékenység és a pontosság, megbízhatóság egy adott módszeren belül függ a konkrét vizsgálati technikától is. További lényeges szempont, hogy a módszer hatékonysága kielégítő legyen, azaz a rendelkezésre álló idő alatt meg lehessen vizsgálni a szükséges mennyiségű mintát. Nem mindegy ugyanis, hogy gyártás közben kell ellenőrzést végezni (például dróthúzásnál), vagy bizonyos alkatrészek kritikus helyeinek vizsgálatára van szükség (például repülőgépek időszakos karbantartásakor). A hibakereső vizsgálatok megválasztásának fontos szempontja a kimutatni kívánt folytonossági hiány jellege, alakja, mérete is (1. táblázat). A vizsgálatot végző szakembereknek alaposan ismernie kell a vizsgált anyag jellemzőit, az üzemeltetés során a rajta keletkező erőhatásokat, tönkremenetelének okát és folyamatát is. Végezetül, természetesen fölmerülnek gazdasági szempontok is, ezeknek figyelembevételével azonban már túlmutatnak az anyagvizsgálat kérdéskörén. A roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárások közül egyik sem tökéletesen megbízható, 100%-os megbízhatóság nem érhető el.



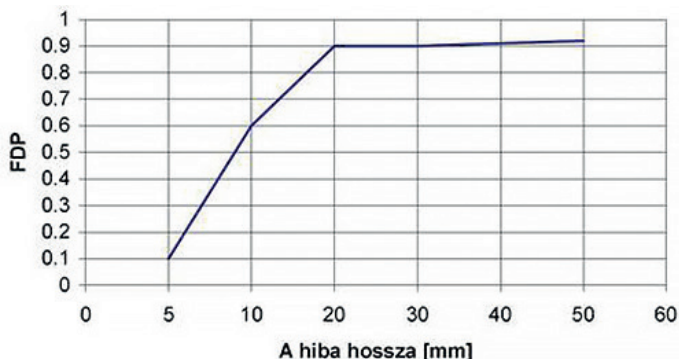
3. ábra

Különböző roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek megbízhatósága. Forrás: Tóth László – Serge Crutzen: *Roncsolásmentes vizsgálati módszerek*. Miskolc, Miskolci Egyetem, 1999. 29–30.

A 3. ábra a különböző roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek megbízhatóságát mutatja be, és megállapítható, hogy az ET-vizsgálat 0,35–1,2 mm-es lemezvastagságoknál is igen magas megbízhatósággal rendelkezik.¹¹

¹⁰ Tóth Ferenc: Roncsolásmentes anyagvizsgálatok. *Anyagvizsgálók Lapja*, (1994), 3. 72–111.

¹¹ J. Boogaard – G. M. Van Dijk: NDT Reliability and product quality. *NDT & E International*, 26. (1993), 3. 149–155.



4. ábra

Örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer detektálási valószínűsége különböző hosszúságú folytonossági hiányok esetén. Forrás: Tóth László – Serge Crutzen: *Roncsolásmentes vizsgálati módszerek*. Miskolc, Miskolci Egyetem, 1999. 29–30.

A 4. ábra alapján megállapítható hogy az ET-vizsgálat igen rövid folytonossági hiányok detektálását is magas megbízhatósággal kimutatja.¹² A roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel elérhető határérzékenységet az 1. táblázat alapján határozhatjuk meg.¹³

1. táblázat

A roncsolásmentes vizsgálati módszerekkel elérhető határérzékenység. Forrás: Rohács József – Simon István: *Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1989. 406–407.

Vizsgálati módszer	Az észlelt repedés min. mérete, mm		
	Nyílásszélesség a felületnél	Mélység	Hosszúság
Optikai vizuális:			
• szemmel	0,1	–	2...3
• optikai készülékkel	0,01...0,1	–	2...3
Folyadékpenetrációs	0,001...0,05	0,1	0,1...0,3
Mágnesporos	0,001	0,1	0,5...1
Örvényáramos	0,001	0,3...0,5	1,5...5
Ultrahangos:			
• felületi hullámok esetén (lapátéleken)	0,001	0,3	–
• lemez hullámok esetén	0,001	0,1	10
• rezonanciaeljárás esetén ¹⁴	–	–	–
Röntgensugaras	0,1	az átvilágított vastagság 1,5...3%-a	–

Az örvényáramos mérőszondákat felhasználva az anyaghiba elhelyezkedéséről, esetleges térbeli kiterjedéséről is információt kapunk. Ennek gyakorlati jelentősége markánsan akkor jelentkezik, amikor kritikus elhelyezkedésű vagy méretű hibahelyeket kell megkülönböztetni a biztonság számára irreleváns, egyéb anyaghibáktól, illetve a konstrukciós elemek hatásaitól.

¹² S. Crutzen – F. Frank – L. Fabbri – P. Lemaitre: *Compilation of NDE effectiveness data*. Final Issue, The Netherlands, JRC Petten, 1999. 60–61.

¹³ Rohács József – Simon István: *Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1989. 406–407.

¹⁴ *Rezonanciaeljárás*: 25 mm² területű elégtelen ragasztás észlelését teszi lehetővé.

Az örvényáramos anyagvizsgálati módszer sokoldalúan alkalmazható, azonban ennek is megvannak a maga korlátai. Helytelen tehát az a szemlélet, amely megpróbálja szembeállítani az egyéb roncsolásmentes eljárásokkal (például a repedésvizsgálat területén az ultrahangos vagy a folyadékbehatolásos módszerrel), hiszen ezek sokkal inkább kiegészítik, mintsem helyettesítik egymást. Egyéb eljárásokkal történő összehasonlításakor az örvényáramos módszer mellett a következő indokok szólnak:

- nincs szükség mechanikai kontaktusra a szonda és a vizsgálandó objektum között;
- nem igényel felület-előkészítést, és utólag sem kell a mintát tisztítani;
- igen gyors, folyamatos mérést tesz lehetővé;
- alkalmazása semmilyen környezet- és egészségvédelmi problémát nem vet föl.

Tekintetbe kell azonban venni az alábbi hátrányokat is:

- csak a minta felületközeli tartományáról ad információt;
- a detektált jel számos paramétertől függ, ezért viszonylag sok zavaró effektusra lehet számítani;
- az optimális mérési paraméterek megválasztása és az eredmények kiértékelése sok esetben képzett szakembert követel.

Az örvényáramos módszeren belül valamilyen konkrét mérés technika alkalmazását szintén az előzőekben tárgyalt szempontok alapján lehet eldönteni. Ennek kapcsán meg kell határozni az adott feladathoz illeszkedő szonda és mérőműszer típusát, valamint a vizsgálat paramétereit.

4. Örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer megtervezése

4.1. Szondaválasztás

A vizsgálati problémához illeszkedő mérőszonda kiválasztása a minta alakja (mérete), a szükséges mérési érzékenység és hatékonyság alapján történik. Gyűrű-, illetve belsőszondával egyszerű alakzatok (rudak, csövek, furatok) vizsgálhatók. Ezekkel a szondákkal a minta teljes keresztmetszetét vizsgálhatjuk (pontosabban: abból egy olyan vastag réteget, amelyet a skin-effektus megenged). Elsősorban tehát az egész keresztmetszetre kiterjedő minőségváltozásokat (például az eltérő ötvözet tartalmat) mutatják ki jól. Kevésbé érzékenyek viszont arra, ha csak egy szűk tartományban módosul az örvényáramok útja és sűrűsége (például egy repedés vagy zárvány miatt). Amennyiben azonban a nagy érzékenység nem követelmény, hatékonyan alkalmazhatók hibafelderítésre is, mivel egyszerű és gyors vizsgálatot tesznek lehetővé. Tapintószondával – ha az elegendően kicsi – tetszőleges alakú mintán végezhető nagy érzékenységű vizsgálat. Ennek viszont ára van: a vizsgálandó objektum teljes felületének

letapogatása, különösen bonyolult alakzatoknál sok időt igényel. A különböző kialakítású örvényáramos anyagvizsgáló szondákat az 5. ábrán láthatjuk.¹⁵

A cikkünkben bemutatott mérés az OLYMPUS ML/100kHz–500kHz/A/60.03/4FX szondával történt.



5. ábra
Örvényáramos anyagvizsgáló szondák. Forrás: Bozóki János felvétele

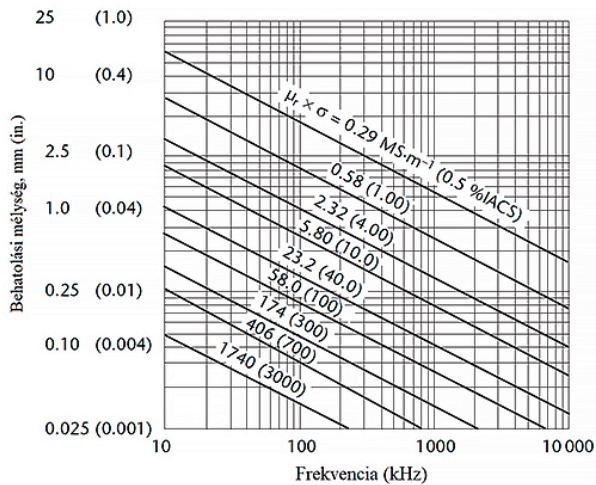
4.2. Frekvenciaválasztás

A frekvenciát a szükséges behatolási mélység, az érzékenység és a vizsgálati sebesség figyelembevételével kell megválasztani. A frekvenciaválasztás szempontjából a behatolási mélység nem igényel bonyolult megfontolásokat. Egyes esetekben az a cél, hogy az anyag mélyebb rétegeit is vizsgálhassuk (például hibakeresés), máskor viszont csak a felületet akarjuk ellenőrizni.¹⁶ A feladat alapján meghatározott behatolási mélységhez tartozó felső, illetve alsó határfrekvencia a 6. ábráról egyszerűen leolvasható. (Például 500 kHz-en vörösréz mintánál a standard behatolási mélység $\delta = 0,1$ mm.)¹⁷

¹⁵ Donald J. Hagemeyer: *Fundamentals of Eddy Current Testing*. Columbus, Ohio, American Society for Nondestructive Testing, 1990. 61–62.

¹⁶ Patrick O. Moore: *Electromagnetic Testing*. In *Nondestructive Testing Handbook*. 3rd edition. Vol. 5. Columbus, American Society for Nondestructive Testing, 2004. 21–23.

¹⁷ Kajdi Gyula: *Anyagvizsgálat örvényáramokkal*. Budapest, Szakmai Továbbképző és Átképző Vállalat 1990. 47–48.



6. ábra

Behatolási mélység változása a frekvencia függvényében.¹⁸ Forrás: Kajdi (1990) i. m. 47–48.

A vizsgálati sebesség és a kívánt hibafelbontás együttesen meghatároznak egy alsó határfrekvenciát, amely alatt a hibák már nem detektálhatók teljes biztonsággal. A frekvencia megválasztásának alapvető szempontja az a magától értetődő igény is, hogy a mérési érzékenység az adott vizsgálat során a lehető legnagyobb legyen. A mérőrendszereknek különböző paraméterek egységnyi megváltozására adott relatív jelváltozása általában erősen frekvenciafüggő.

Az ellenőrzési feladathoz 200 kHz frekvenciát választottam, igazodva az alkatrész anyagához és a szükségés behatolási mélység követelményéhez.

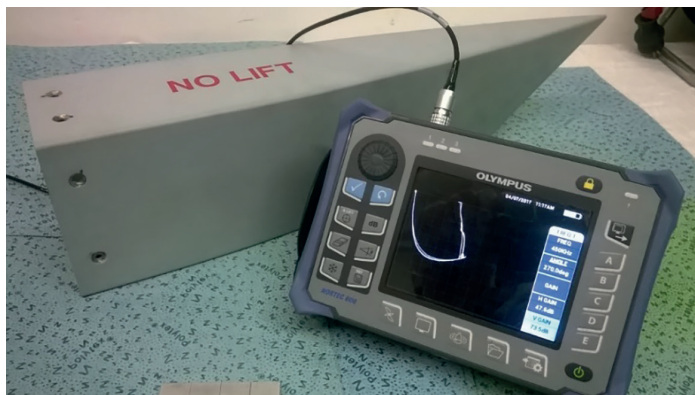
4.3. Műszerválasztás

Az előzőekben leírt szempontok alapján megtervezett méréshez általában katalógusok és prospektusok segítségével meg lehet találni a megfelelő műszert vagy vizsgálóberendezést. A gyártók rendszerint széles szondaválasztékot is kínálnak, amelyből az esetleg meglévő műszerekhez pótlólag is lehet rendelni. A Magyar Honvédség üzemeltetési rendszerében többféle működési elvű és rendeltetésű örvényáramos készülék van rendszeresítve.

- A klasszikus örvényáramú mérés technikai elvek alapján működő az anyag és a mágnes tér között kialakuló kölcsönhatás mértékének vizsgálatára alkalmas impedanciatekercs felhasználásával épített vizsgálókészülék (lásd: 7. ábra).
- A nagy térbeli felbontóképességgel rendelkező mágnesszenzorra épülő örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálati berendezés.¹⁹

¹⁸ σ : elektromos vezetőképesség (siemens/méter – S/m); μ : relatív mágneses permeabilitás (henry/méter, H/m).

¹⁹ Vértesy Gábor – Gasparics Antal – Pávó József: Elektromágneses roncsolásmentes anyagvizsgálat nagy érzékenységű mágnesestér-mérő szenzor alkalmazásával. *Anyagvizsgálók Lapja*, 15. (2005), 2. 46–48. 47.



7. ábra

Örvényáramos anyagvizsgáló készülék. Forrás: Kavás László felvétele

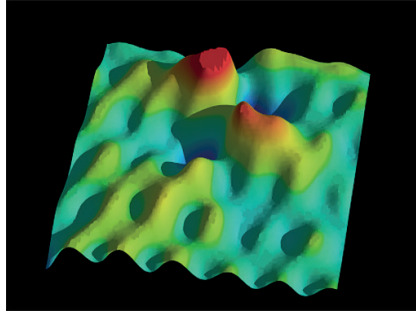
5. Mágnesszenzor alkalmazása örvényáramú anyagvizsgálati eljárások területen

A klasszikus örvényáramú anyagvizsgálat lehetőségeiben rejlő ellentmondásokat a gerjesztés és az érzékelés szétválasztásával lehet feloldani. Ez a szeparáció lehetővé teszi, hogy olyan gerjesztőtérrel alkalmazzunk, amely esetében a kimutatandó hibahely a lehető legjobban megzavarja az anyag belsejében az örvényáramok eloszlását; illetve hogy a mérőelemet térben úgy helyezzük el, hogy az a lehető legérzékenyebb módon észlelje ezt a zavart (az örvényáramok térbeli eloszlásának torzulása hatására, a mágnes térben megjelenő torzulásokat). A kellő behatolási mélység biztosítására elektromosan jól vezető anyagok (például alumínium) esetében az alkalmazható gerjesztőtér-frekvencia mindössze néhány kHz. Ilyen alacsony frekvenciájú mágnes teret induktív módon már nehézkes mérni, nagy érzékenységet pedig egyéb fizikai okok miatt lehetetlen elérni. Így kézenfekvő, hogy az örvényáramú anyagvizsgálati mérőfejben az érzékelő elem szerepét egy magas szenzibilitású mágnesszenzor (Fluxset) töltsse be. A kisméretű Fluxset mágneses térmérő eszközt két tulajdonsága teszi ideálissá az örvényáramú anyagvizsgálatra:

- nagy térbeli felbontóképesség (jobb mint $50 \mu\text{m}$);
- frekvenciafüggetlen érzékenysége (amely a nagy behatolási mélységet igénylő alacsonyfrekvenciás vizsgálatok során döntő jelentőségű).

A bonyolultabb belső szerkezetű, összetett, többrétegű anyagok esetében is megvalósítható a képalkotás. A helikopterforgószárny-lapát méhsejtszerkezetének a „FluxGet” örvényáramú roncsolásmentes anyagvizsgálati berendezés segítségével készített képe látható a 8. ábrán.²⁰

²⁰ Bozóki János et al.: Applying Eddy Current Non Destructive Testing (NDT) Equipment for Military Aircraft Maintenance. *Transport Means* 2015, 2015. 349–352.

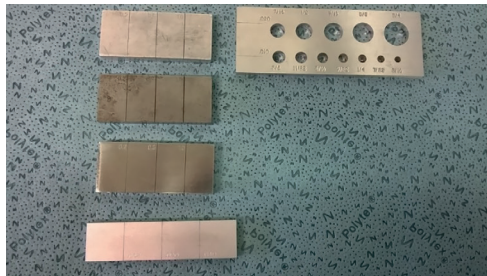


8. ábra

A helikopterforgószárny-lapát deformálódott méhsejtszerkezetéről alkotott kép. Forrás: Vértesy–Gasparics–Pávó (2005) i. m. 47.

5.1. Kalibráció

Ha örvényáramos készülékünket valamilyen mennyiség (például vezetőképesség, repedésmélység, keménység) számszerű meghatározására akarjuk használni, akkor ehhez eszközünket kalibrálni kell. A kalibráció lényege az, hogy a mindenkor műszerkijelzést egyértelműen megfeleltetjük a mérendő mennyiség valamilyen értékének. Ez a megfelelés természetesen csak adott beállítás mellett lesz érvényes, a készülékparaméterek megváltoztatása új kalibrációt tesz szükségessé. Az örvényáramos vizsgálat ráadásul több fizikai és geometriai paraméterre érzékeny, egyetlen kalibráció nem terjeszthető ki minden elrendezésre, szondatípusra, illetve anyagfajtára. A hitelesítést az egyes esetekben mindig külön kell végrehajtani. A kalibrációhoz ellenőrző próbatestekre van szükség, azaz olyan mintákra, amelyeknek a mérés szempontjából meghatározó paramétere számszerűen ismert, egyéb tulajdonságai (például alakja, permeabilitása) pedig megegyeznek a vizsgálandó alkatrész megfelelő paramétereivel. Ehhez olyan etalonsorozatot használunk, amelynek darabjaiban különböző, ismert mélységű (többnyire mesterséges) repedések találhatók (lásd: 9. ábra).²¹



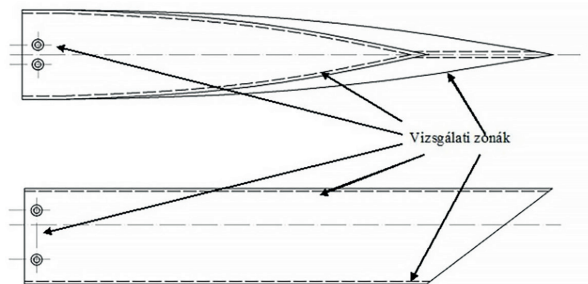
9. ábra

Kalibráló etalonok. Forrás: Bozóki János felvétele

²¹ Vernice A. Mayer: *Annual Book of ASTM Standards*. Nondestructive Testing, Volume 03.03., Eagan, MN, USA, ASTM INTERNATIONAL, 2018. 55–56.

6. Az örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálat végrehajtása

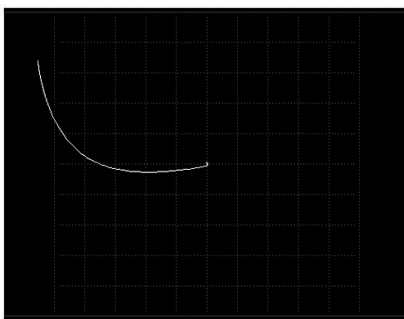
A repülőgéppalkatrész-tervező vagy -gyártó szervezet a tervezési előírások, illetve az üzemeltetési tapasztalatok alapján kiszolgálási közlönyökben határozza meg a vizsgálat elfogadási szintjét és az ellenőrzés gyakoriságát.²² A vizsgálat célja az áramvonalazó lemez hegesztési varratai környezetében a felületközeli vagy felületre nyitott repedések kimutatása. A vizsgálati zónák az áramvonalazó lemezek hegesztési varratainak szaggatott vonallal jelzett környezete a 10. ábra szerint.



10. ábra

Az áramvonalazó lemez vizsgálati zónái alul- és oldalnézetben. Forrás: D. Cox: *Service Bulletin ML-7700000-001 (Rev 1) MML-NMML – Rear Fairing Cracking*. Cobham Mission Equipment Proprietary Data, Dorset, England, 2012.

Az előző fejezetekben leírtak alapján és a kiszolgálási közlönyben előírtak figyelembevételével a kalibrált mérőberendezéssel a vizsgálati zónákban található hegesztési varratok vizsgálatát megfelelő lépésközzel haladva a tapintószondával a teljes vizsgálati zónát lefedve az ellenőrzés végrehajtható. A vizsgálókészülék kijelzőjén az elemelést követően a vizsgálati zónák letapogatása során, ha nem jelenik meg jelzés, akkor az alkatrész megfelelő, és továbbüzemeltethető (lásd: 11. ábra).

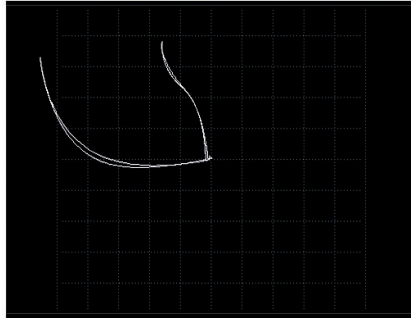


11. ábra

A vizsgálókészülék kijelzőjén az elemelés jele. Forrás: Bozóki János felvétele

²² D. Cox: *Service Bulletin ML-7700000-001 (Rev 1) MML-NMML – Rear Fairing Cracking*. Cobham Mission Equipment Proprietary Data, Dorset, England, 2012.

Repedés vagy más folytonossági hiány esetén a képernyőn az előző fejezetekben elemzett módon és irányban jelenik meg a hibajel (12. ábra).



12. ábra

A vizsgáló készülék kijelzőjén a repedés jele. Forrás: Bozóki János felvétele

Repedés feltárása esetén meg kell határozni a repedés hosszát. Ha a repedés hossza meghaladja a kiszámítási közlönyben előírt paramétereket, a szerelt lemezborítást üzemképtelennek kell tekinteni, és a rakétaindító sint a további vizsgálatokig el kell különíteni.

7. Repülőeszköz élettartama alatt végrehajtott NDT-vizsgálatok²³

NDT-vizsgálatot természetesen a repülőgép üzemeltetése, élettartama alatt nagyon sok esetben kell végrehajtani. Normál üzemeltetési viszonyok között a gyártó egyértelműen meghatározza, melyek azok az NDT-vizsgálatok, amelyeket megfelelő ciklusidőnként vagy egyedi esetekben végre kell hajtani a meghatározott alkatrészekben. A kidolgozott üzemeltetési okmányok, illetve az időközönként kiadott bulletinek az üzemeltetést végrehajtó állomány rendelkezésére állnak. A szakemberek felkészítését és a megfelelő gyakorlati idő megszerzését követően az ellenőrzések végrehajthatók.

A légi járművek normál üzemeltetési viszonyoktól eltérő esetekben is hajthatnak végre feladatot. Katonai repülőeszközök rendeltetésüknek megfelelően a kiképzést követően harci alkalmazásban is részt vehetnek. Műveleti területen történő alkalmazás esetén a kézfegyverektől vagy más pusztító eszköz behatására sérülések keletkezhetnek a repülőtechnika szinte bármelyik rendszerén. A javítás sikeres végrehajtásának egyik elengedhetetlen feltétele a folytonossági hiányok pontos, gyors felderítése. Az NDT által biztosított információkra támaszkodva a javítást végrehajtó állomány biztosítani tudja a technikai eszköz újbóli hadrafoghatóságát. Az előző fejezetekben ismertetett örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálati eljárás előnyeit kihasználva nagymértékben hozzájárul a feladat sikeres végrehajtásához.²⁴

²³ NDT: Non Destructive Testing, roncsolásmentes anyagvizsgálati módszer.

²⁴ Charles F. Tiffany: *Aging of U.S. Air Force Aircraft: Final Report*. Washington, D. C., The National Academies Press, 1999. 65–66.

8. Következtetések

A bemutatott örvényáramos vizsgálat alkalmazásával a katonai légi járművek üzemeltetése során kialakuló anyagfolytonossági hiányok elhelyezkedéséről, esetleges térbeli kiterjedéséről is nyerhető információ. Ennek gyakorlati jelentősége akkor jelentkezik igazán, amikor kritikus elhelyezkedésű vagy méretű hibahelyeket kell megkülönböztetni a biztonság számára irreleváns egyéb anyaghibáktól, illetve a konstrukciós elemek hatásaitól. A légi járművek hadrafoghatóságának biztosításához magas szintű kiképzettséggel, gyakorlattal és felszereltséggel rendelkező szakemberek közreműködési szükségességek. Az örvényáramos roncsolásmentes anyagvizsgálat szélsőséges üzemeltetési viszonyok között akár műveleti területen is széles körben alkalmazható.

Felhasznált irodalom

- Boogaard, J. – G. M. Van Dijk: NDT Reliability and product quality. *NDT & E International*, 26. (1993), 3. 149–155. DOI: [https://doi.org/10.1016/0963-8695\(93\)90601-P](https://doi.org/10.1016/0963-8695(93)90601-P)
- Bozóki János – Óvári Gyula – Varga Béla – Kavás László: Applying Eddy Current Non Destructive Testing (NDT) Equipment for Military Aircraft Maintenance. *Transport Means 2015*, 2015.
- Cox, D.: *Service Bulletin ML-7700000-001 (Rev 1) MML-NMML – Rear Fairing Cracking*. Cobham Mission Equipment Proprietary Data, Dorset, England, 2012.
- Crutzen, S. – F. Frank – L. Fabbri – P. Lemaitre: *Compilation of NDE effectiveness data*. Final Issue, The Netherlands, JRC Petten, 1999.
- Fox, Robert W. – Alan T. McDonald: *Introduction to Fluid Mechanics*. USA, John Wiley & Sons, 1994.
- Hagemaijer, Donald J.: *Fundamentals of Eddy Current Testing*. Columbus, Ohio, American Society for Nondestructive Testing, 1990.
- Kajdi Gyula: *Anyagvizsgálat örvényáramokkal*. Budapest, Szakmai Továbbképző és Átképző Vállalat, 1990.
- Kavás László: *Harcászati repülőgép kiválasztásának módszere, gazdasági hatékonysági mutatók alapján, kis létszámú haderő légierejének korszerűsítésére*. PhD-értekezés, Budapest, Zrínyi Miklós Nemzetvédelmi Egyetem, 2009.
- Libby, Hugo L.: *Introduction to Electromagnetic Nondestructive Test Methods*. New York, John Wiley & Sons Inc, 1971.
- Mayer, Vernice A.: *Annual Book of ASTM Standards*. Nondestructive Testing, Volume 03.03., Eagan, MN, USA, ASTM INTERNATIONAL, 2018.
- Moore, Patrick O.: Electromagnetic Testing. In *Nondestructive Testing Handbook*. 3rd edition. Vol. 5. Columbus, American Society for Nondestructive Testing, 2004.
- Peták György – Szabó József: *A Gripen*. Budapest, Petit Real Könyvkiadó, 2003.
- Rohács József – Simon István: *Repülőgépek és helikopterek üzemeltetési zsebkönyve*. Budapest, Műszaki Könyvkiadó, 1989.
- Tiffany, Charles F.: *Aging of U.S. Air Force Aircraft: Final Report*. Washington, D. C., The National Academies Press, 1999.
- Tóth Ferenc: Roncsolásmentes anyagvizsgálatok. *Anyagvizsgálók Lapja*, (1994), 3. 72–111.
- Tóth László – Serge Crutzen: *Roncsolásmentes vizsgálati módszerek*. Miskolc, Miskolci Egyetem, 1999.
- Vértesy Gábor – Gasparics Antal – Pávó József: Elektromágneses roncsolásmentes anyagvizsgálat nagy érzékenységű mágnesestér-mérő szenzor alkalmazásával. *Anyagvizsgálók Lapja*, 15. (2005), 2. 46–48.