

DIGITÁLIS NEUTRON- ÉS RÖNTGEN RADIOGRÁFIA ALKALMAZÁSA A HELIKOPTER FORGÓSZÁRNYLAPÁTOK VIZSGÁLATÁBAN

1. Bevezetés

A digitális technika elterjedése a műszaki élet minden területén jelentős fejlődést eredményezett. Ez vonatkozik a különböző roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek területeire is. A repülés technika eszköz parkja, hosszú tervezési- és fejlesztési időt igénylő, viszonylag bonyolult, valamint költséges alkatrészekből épül fel. Ezek az elemek megkövetelik a roncsolásmentes anyagvizsgálati módszerek széles körű alkalmazását, amelyeknek nagy a jelentőségük a prototípusok kifejlesztésében, fontosak a sorozatgyártás termékeinek minőségbiztosításában, de nélkülözhetetlenek az esetleges meghibásodások okainak analizálására irányuló oknyomozó tevékenységben is.

Az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet Budapest kutató reaktoránál 2001-ben kiépítettünk egy a helikopterek forgószárnylapátjainak állapot meghatározására alkalmas neutron- és röntgen radiográfiai mérőhelyet, az MH RMSZF és a HM Technológiai Hivatal felkérésére. A neutron sugárzás segítségével ki tudjuk mutatni az elvállásokat a főtartó és a szektor elemek ragasztásainál, észlelni tudjuk az idegen tárgyak behatolását, de még az azok hatását elkerülő javítások minőségét is ellenőrizhetjük vele, a műgyanta elhelyezkedésével kapcsolatos rendellenességek (porozitás, gyantában dús, illetve gyanta szegény területek) láthatóvá tehetők, megfigyelhetjük a szektorok közé behatoló vizet és annak eloszlását, de érzékelni tudjuk a fém alkatrészek, takarásban lévő, kezdődő korrózióját is. A röntgen sugárzással látjuk a nagy (néhány cm³-nyi) víz beszivárgásokat, az idegen tárgyak behatolását és a fém alkatrészek kezdődő korrózióját (még a jégtelenítő kontaktusainál) is.

A mérőhelyünkön kétféle digitális jelrögzítési lehetőség áll a rendelkezésünkre. Az egyik technika, hasonló a hagyományos radiográfiai filmes módszerhez, statikus, állóképes felvételek (felvételi idő ~1 perc) készítésére alkalmas. A vizsgálati tárgy radiográfiai árnyképe, elektromos töltés képként kerül megörökítésre egy speciális anyagokat tartalmazó, imaging plate (IP) lemezre. A másik digitális felvételi technika nagyérzékenységű CCD kamera alkalmazásán alapul. Ebben az esetben a vizsgálati tárgy árnyképe egy sugárzás-fény átalakítón jelenik meg, amit a kamera érzékel. Ez esetben akár élőidejű (40 msec képidő) megjelenítés is lehetséges és a jelenségek mozgásban is láthatóvá tehetők, ~100 µm-es felbontással, a digitális kép itt is közvetlenül a vezérlő PC-be kerül.

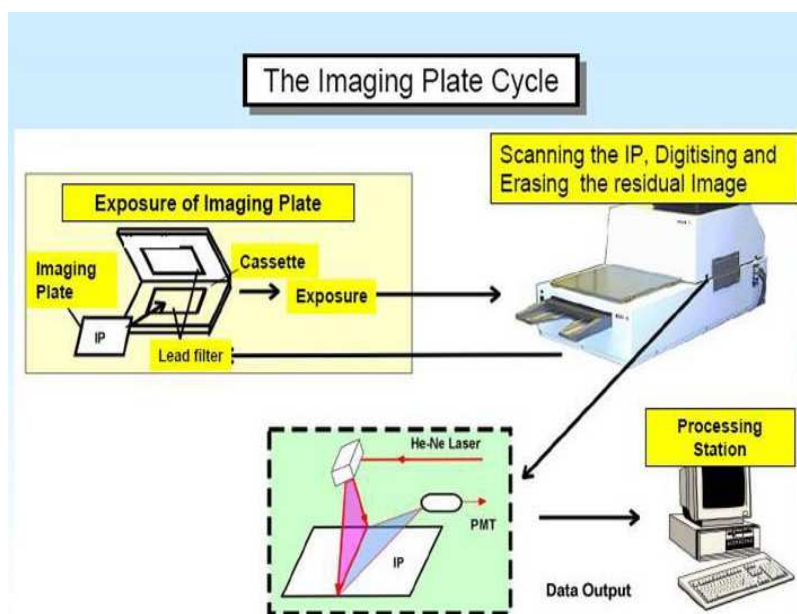
A munkánk során Mi-2, Mi-8, Mi-17 és Mi-24 típusú helikopterek fém-kompozit szerkezetű-, valamint a Ka-26 típusú helikopterek műanyag-kompozit szerkezetű forgószárnylapátjait vizsgáltuk,

mindkét nálunk meglévő digitális radiográfiai technikával, kihasználva a rendelkezésünkre álló neutron- és röntgen sugárnyalábok által szolgáltatott komplementer információszerzési lehetőségeket.

2. Mérési módszer

2.1. Imaging Plate módszer

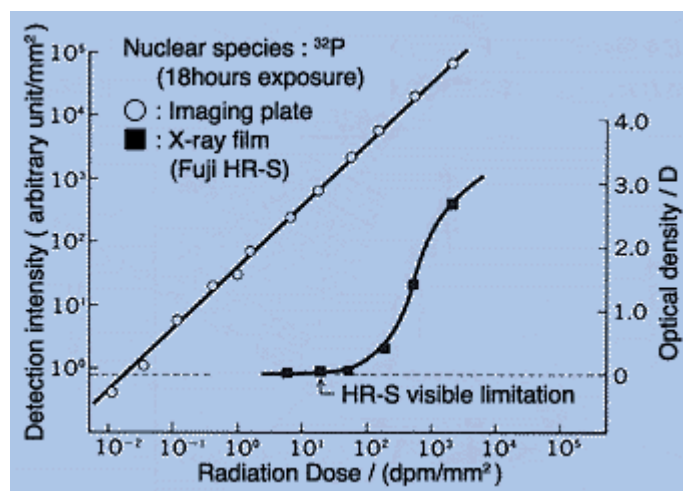
Japán kutatók a múlt század 80-as éveiben szabadalmaztatták a sugárzási árnykép (radiográfiai kép) töltés képpé alakítását, majd annak digitalizált vizuális képként való megjelenítését. Ez az, úgynevezett imaging plate (IP) technika. Elsőként az orvosi diagnosztikában terjedt el, ami érthető is, mert töredékére csökkenti a vizsgált személyek sugárterhelését, mivel sokkal érzékenyebb, mint a röntgen film. Az 1. ábrán látható az IP technika működési vázlatja.



1. ábra. Az IP technika működési vázlatja

A vizsgálati tárgy radiográfiai árnyképe, elektromos töltés képként kerül megőrzítésre egy speciális anyagokat tartalmazó, IP lemezre (ND 20x25 neutron radiográfiai- és MS 20x25 röntgen radiográfiai felvétel esetén). A kép felvétel során célszerű a lemezt egy gyári exponáló kazettába helyezni, de egyéni kivitelezésű tartóban is lehetséges a felvétel elkészítése. A sugárzás által megvilágított lemezt egy (BAS 2500 típusú) letapogató egységbe kell helyezni, ahol egy He-Ne lézer sugarával, egy galvanikus tükör segítségével pixelről-pixelre (pixel méret: $50 \times 50 \mu\text{m}^2$) kiolvasásra kerül a töltés kép. A felvillanó fény információkat egy speciális multiplier érzékeli, az így keletkező jelek megfelelő processzálása után, a vizsgálati tárgy radiográfiai képe, az egység monitorán jelenik meg. Lehetőség van a különböző képfeldolgozási eljárások alkalmazásával a radiográfiai kép optimalizálására. A technika további előnye, hogy érzékenysége ~25-szöröse a filmes módszernek (rövidebb megvilágítási idő elegendő - kisebb a sugárterhelés), széles és lineáris a dinamika tartomány, közvetlenül kerül a digitális kép a letapogatóból a PC-be, integrális típusú detektor és az IP lemez kiolvasás után

törölhető, legalább 1000-szer újra használható. Egy további járulékos előnye is van, nincs szükség sötétkamra technikára és nincs szükség vegyszeres kezelésre, ezáltal megakadályozhatjuk, hogy minél kevesebb szennyező, környezetkárosító anyag jöjjön létre és kerüljön ki a környezetbe. Kétségtelen, hogy magas szintű műszaki és környezeti feltételeket igényel a telepítése, és csak magas szintű képzésben részesült személyzet (RT3; PhD) üzemeltetheti.



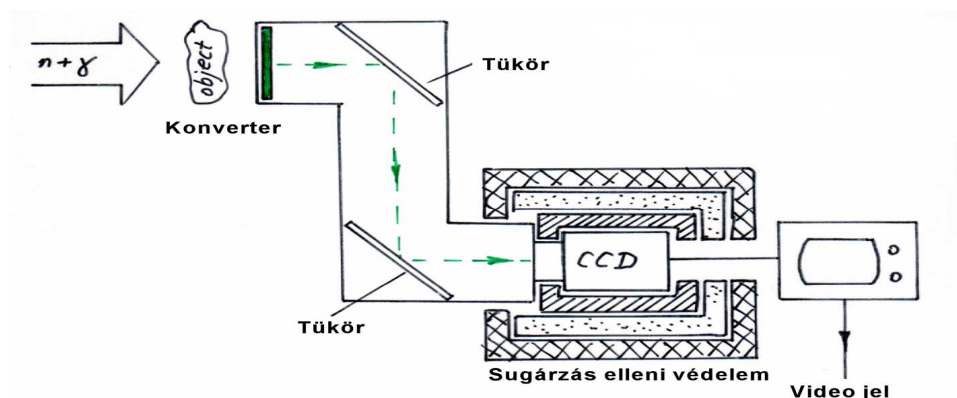
2. ábra. Az IP lemez és röntgen film technika összehasonlításának néhány jellemzője

A baloldali függőleges koordináta tengelyen a detektálás intenzitása (érzékenység), a jobb oldalin az optikai sötétedés értéke van feltüntetve, míg a vízszintes tengelyen a sugárzás dózisének értéke látható. Megfigyelhető, hogy az IP lemez már egészen alacsony dózis értékeknél is érzékel és végig lineárisan viselkedik az egész detektálási intervallumban.

2.2. CCD kamerás módszer

A CCD, mint fényt elektromos jellé alakító eszköz, nagyon sokrétűen alkalmazható, olyan területeken ahol a digitális képrögzítés a cél. A CCD kamerák elterjedését a félvezető gyártástechnológia nagy mértékű fejlődése tette lehetővé. A nukleáris reaktorok nyújtotta, a rendkívül érzékeny gáz diffúziós technológiai lépést kiiktató, a tömb egykristályon belül végrehajtható szilícium-foszfor átmenet előállítás, lehetővé tette a "hibamentes" félvezető lapkák létrehozását, amelyek nélkülözhetetlen feltételei a CCD eszközök gyártásának. Fontos része a CCD kamerának az átalakító és a hűtőrendszer valamint a csatlakozó számítógép is elengedhetetlen kellék.

A CCD kamerás digitális radiográfiai képfelvevő elrendezés vázlata a 3. ábrán látható.



3. ábra. A CCD kamerás digitális radiográfiai képfelvevő elrendezés vázlata

Munkánk során a nagyon kis fényességkülönbségeknek is jelentős szerepe van ezért fontos, hogy a rögzíteni kívánt kép finom részletei is megfigyelhetők legyenek, ennek érdekében jó felbontású átalakítóra van szükség. Esetünkben a vizsgálati tárgy által keltett sugárzások árnyképét egy sugárzás fényátalakító lemez teszi láthatóvá. A kilépő, kis intenzitású fény, egy tükörről reflektálódva kerül a képalkotó, távvezérelhető zoom optikával felszerelt nagyérzékenységű CCD kamerába. A sötétáram szobahőmérsékleten akár néhány másodperc alatt telítésbe viheti a pixeleket, ez a jelenség csökkenthető, vagy akár meg is szüntethető hűtéssel. A CCD kamerát kétkörös Peltier-elemes hűtőbordával láttuk el. A PC feladata a kamera vezérlése, a kép megjelenítése, annak tárolása és rögzítése. A felvétel digitalizált képe tehát a PC monitorán jelenik meg. A számítógépnek legalább akkora memóriája kell, hogy legyen, amekkora a kép információ tartalma, viszont ha ezen a számítógépen történik a képfeldolgozás akkor egy nagyobb teljesítményű gépre van szükség. A képek felvétele egyidejűleg DVD lemezre és hagyományos S-VHS videomagnóra is rögzíthető.

A képalkotó rendszer főbb adatai:

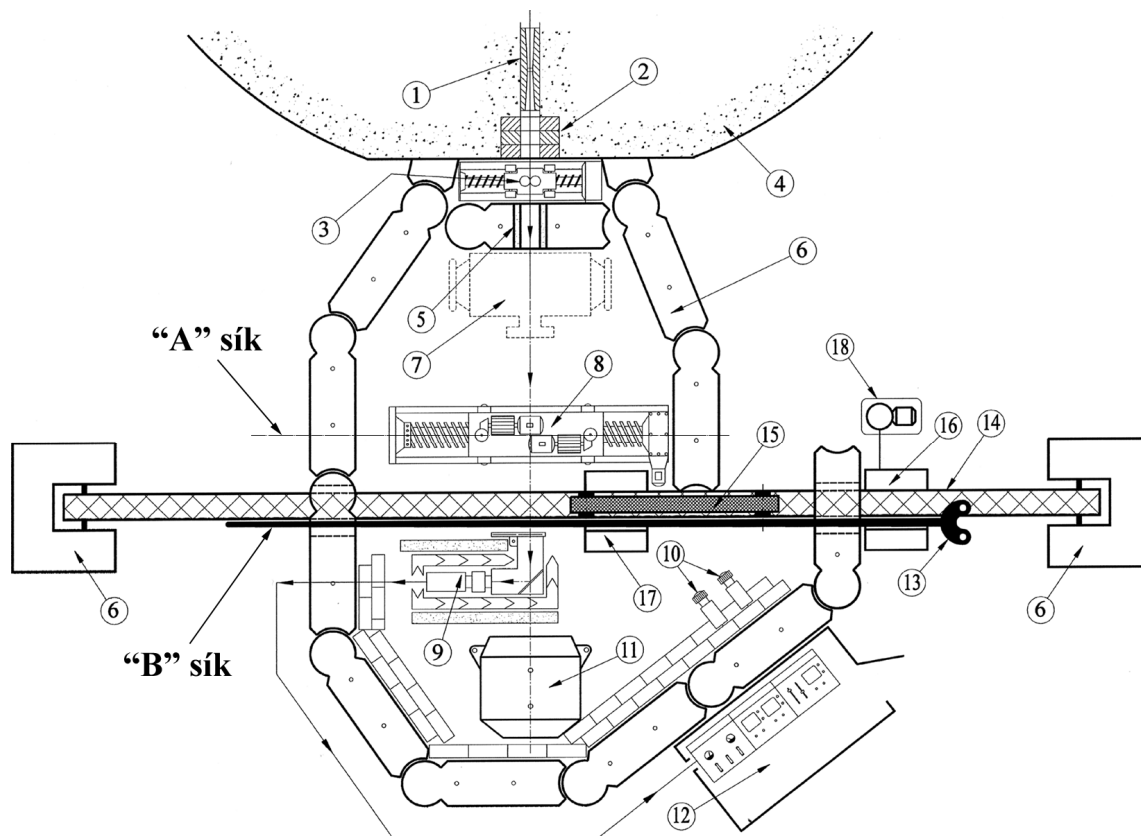
- érzékenység: 10^{-5} lux; 10^{-6} lux (Peltier hűtés); 10^{-7} lux (nitrogén hűtés)
- képfelbontás: 100-300 μm
- képalkotási idő: 40 msec-400 sec
- A/D konverzió: 10 bit

2. Mérőberendezés

A Budapest Kutatóreaktor 2. számú csatornájánál telepített dinamikus radiográfiai állomáson lehetőségünk van neutron- és röntgenradiográfiai felvételek készítésére [1]. A neutronradiográfiai felvételek kiértékelése során információt kapunk a kompozit anyagok kötési és ragasztási felületeinek illeszkedéseire illetve esetleges eltéréseire. Vizsgálhatjuk a szektorok közötti tömítések épségét, valamint a szektorokba beszivárgó víz eloszlását. A röntgen radiográfiai mérésekből következtethetünk a felverődő és a szerkezetbe becsapódó fém alkatrészek helyéről, méretéről, valamint információt kapunk a jégtelenítő rendszer vezetékeinek állapotáról. A 3. ábra a dinamikus radiográfiai mérőberendezés vázlatát mutatja be.

A neutron és gamma sugárnyaláb a reaktor vízszintes, termikus csatornájában kialakított pontszerű komplex kollimátoron keresztül érkezik. A neutron radiográfiai állomás kollimációs tényezője 197 (L/D arány (D – a kollimátor bemeneti apertúrájának átmérője, L – a bemeneti apertúra és a sugárzás fény átalakító lemez közti távolság)). A minta helyén a neutronfluxus $10^8 \text{ n} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sec}^{-1}$ és a sugárnyaláb átmérője 220 mm. A vizsgálati tárgyak a reaktorfaltól 2 m-re - "A" sík- és 2,8 m-re - "B" sík- helyezhetők a sugárnyaláb tengelyére merőlegesen távvezérelhető módon, a vizsgálandó forgószárnylapátok a "B" síkban mozgathatók.

A mérőhelyen vizsgálható tárgyak legnagyobb felülete: $10000 \times 700 \text{ mm}^2$, a távvezérelt mozgó mechanizmus 250 kg-os tárgyak pozicionálására alkalmas. A röntgenradiográfiai vizsgálatokra egy Szuper Liliput típusú hordozható röntgenkészüléket alkalmaztunk, amelyet a sugárnyaláb pozíciójának megfelelően állítottunk be, a besugárzott terület $150 \times 160 \text{ mm}^2$. A forgószárnylapátok vizsgálatára a 3. ábra 9-el jelölt képfelvevő rendszerét használjuk.



3. ábra. A radiográfiai mérőhely elrendezésének vázlata:

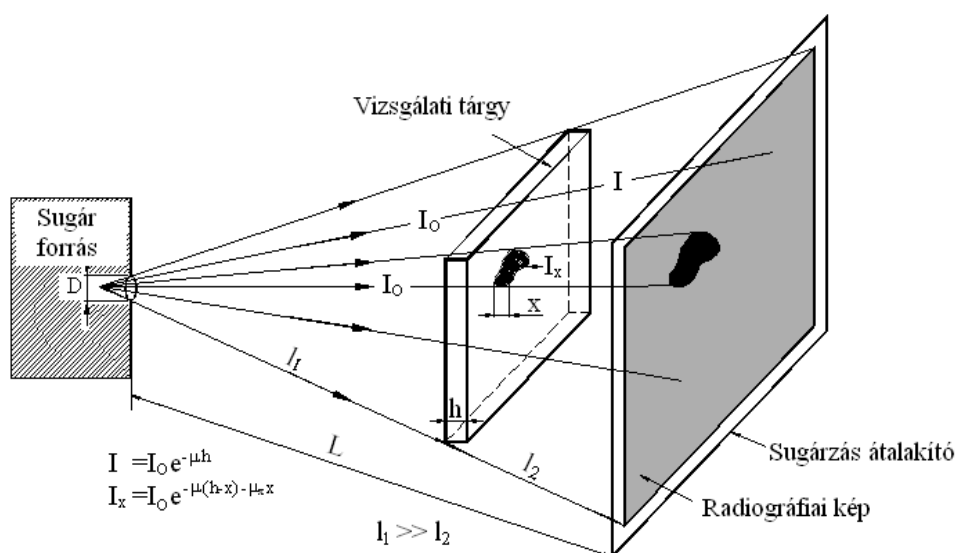
1. Belső kollimátor, 2. Vas zárszerkezet, 3. Nyalábatmérő változtató és szűrő egysége, 4. Reaktorfal,
5. Külső kollimátor, 6. Biológiai védelem, 7. Röntgen generátor helye, 8. Vizsgálati tárgy a hagyományos, távvezérelhető mozgó mechanikával, 9. Képfelvevő rendszer nagyérzékenységű TV kamerával, 10. Háttér TV kamerák, 11. Sugárnyaláb csapda, 12. Mérőfülke, 13. Rotorlapát (~10m),
14. Rotorlapát mozgatósin (~20m), 15. Rotorlapát mozgatókocsi, 16. Nedvesítő berendezés, 17. Szárítóegység és a 18. Nyomásfokozó szivattyú

3. A radiográfiai képalkotás sajátosságai

A radiográfiai vizsgálat alapja, hogy a mintán áthaladó, vagy elnyelődő, illetve szóródó sugárzás a minta hibáinak, jellemzőinek megfelelően a minta mögött elhelyezett sugárzás-fényátalakító lemezen képet hoz létre. A sugárzás és a tárgy közötti kölcsönhatás eredményeként jelenik meg a tárgy radiográfiai képe a sugárzás-fény átalakítón, vetületi képként, amint ez a 4. ábrán látható. A hibák, mint pl. a ragasztási anyagok sajátosságaiból adódó gyantadús illetve gyantahiányos területek kialakulása, ezek folytonosságának esetleges megváltozása, a korrozio megjelenése, rejtett fém alkatrészek kimutatása, továbbá a víz beszivárgás eloszlása eltérő kontrasztú területeket eredményez a radiográfiai képen. Attól, hogy milyen sugárforrást használunk a kép előállítására, beszélünk neutron-, gamma- és röntgenradiográfiáról. Az anyagon áthaladó sugárzás intenzitása a vizsgálati tárgyra jellemző paraméterek függvényében változik, amint azt a sugárgyengülési törvény leírja:

$$I = I_0 e^{-\mu \cdot h} \quad (1)$$

ahol, I_0 – a sugárzás intenzitása a vizsgálati tárgy előtt, I – a sugárzás intenzitása a vizsgálati tárgy mögött, μ – tömeggyengítési együttható és h – az anyagvastagság. Az (1) számú egyenlet a homogén μ tömeggyengítési együtthatóval és h vastagsággal rendelkező anyagon áthaladó sugárzás intenzitás változását írja le. A 4. ábrán látható második egyenlet, egy x vastagsággal és μ_x tömeggyengítési együtthatóval rendelkező anyagfolytonossági hiányt tartalmazó részen áthaladó sugárzás intenzitás változását írja le. A fém és műanyag kompozit szerkezetek esetén is találkozhatunk ezzel a hibajelenséggel.

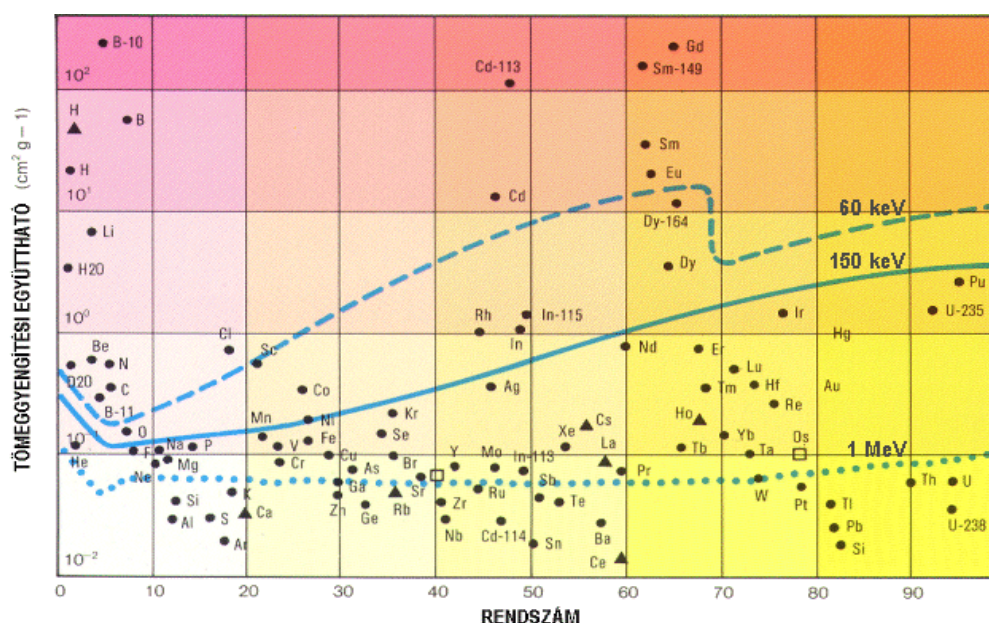


4. ábra. Radiográfiai képalkotás vázlata.

A 5. ábra az egyes elemekre vonatkozó tömeggyengítési együtthatókat mutatja be az elemek rendszámának a függvényében [2]. Az 1 MeV pontvonal a gammasugárzáshoz, míg a 60 KeV-os

szagatott és a 150 keV-os vonal pedig a röntgensugárzáshoz tartozó tömeggyengítési együtthatókat ábrázolja.

A röntgen- és gamma sugarakat a nagyobb rendszámú elemek jobban gyengítik, ez folytonosan változik a rendszámmal, a semleges töltésű neutronokra ilyen egyértelmű összefüggést nem lehet megállapítani, amint az ábrán látható diszkrét, fekete pontok is mutatják. A neutronsugárzásra vonatkozó tömeggyengítési együtthatók nem követik a rendszámmal való folytonosságot, az egymás melletti elemek is eléggé különbözőek tudnak lenni, ezért is tudjuk komplementer mérésenként alkalmazni ott, ahol a röntgen mérésekkel megkülönböztethetetlen "helyeket" látunk. A neutron radiográfia előnye a röntgen- és gamma radiográfiával szemben még az, hogy az alacsony rendszámú anyagok esetében (pl. H_2 és vegyületei) sokkal erősebb a kontraszt és bizonyos elemek, valamint azok izotópjai jobban megkülönböztethetők.



5. ábra. Tömeggyengítési együttható (μ) változása az elemek rendszámának függvényében

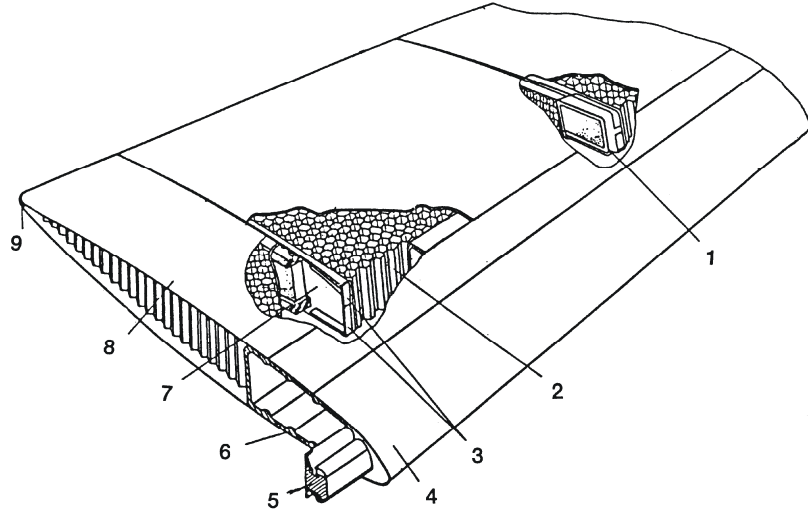
4. Vizsgálati tárgyak

A Magyar Honvédség Repülő Műszaki Szolgálat Főnökségének (MH RMSZF) megbízásából [3-5] Mi-2, Mi-8, Mi-17 és Mi-24 helikopterek fém kompozit szerkezetű forgószárnylapátokat és KA-26 helikopterek műanyag kompozit szerkezetű forgószárnylapátokat vizsgáltunk digitális radiográfiai módszerekkel.

4.1. Fém kompozit szerkezetű helikopter forgószárny lapátok

A Mi-24 helikopterlapátokat 19 szektor építi fel, a lapát paraméterei: 9,85 m hosszú, 700 mm széles, 65 mm vastagságú és 115 kg súlyú. Az általunk vizsgált helikopter forgószárnylapát keresztmetszetét a 6. ábra mutatja be. A szektorok könnyűfém ötvözetből készültek és 0,3 mm vastagságú borítással vannak ellátva. A szektorokat sejtrácsos anyag tölti ki, amelyeket alumíniumfóliából készült

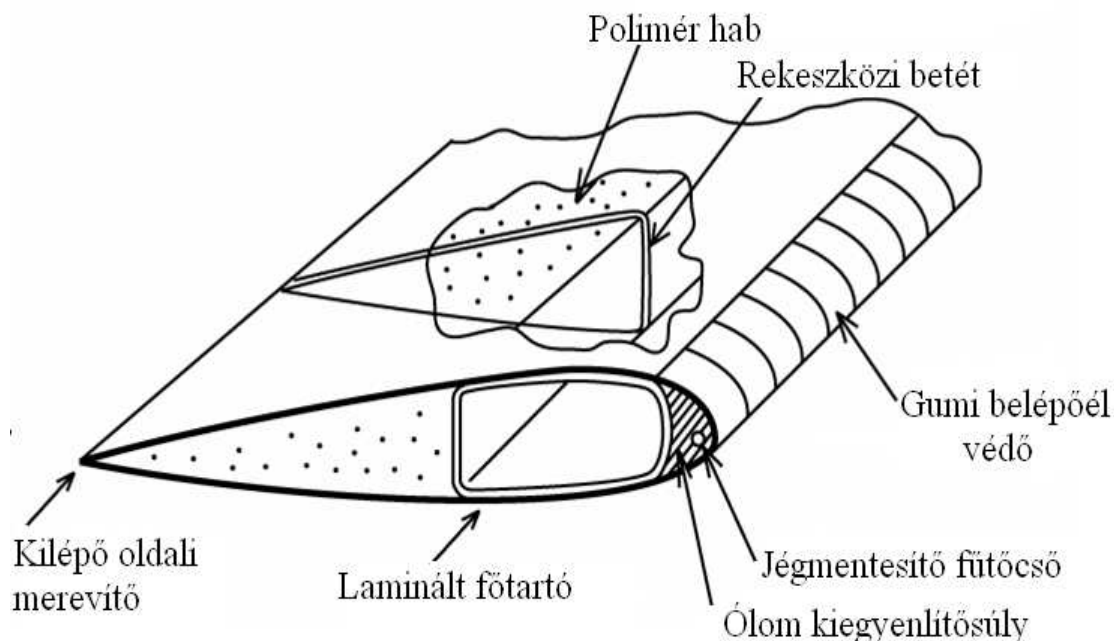
szalagkészlet alkot. A szektor a főtartó övléceihez és gerinclemezének hátsó feléhez van ragasztva. A tömítőbetétek megakadályozzák a szektorok közötti levegő áramlását. A nedvesség eltávozása a végrekeszekből és a végborda töréséből, leeresztő furatokon és levegőző nyílásokon át történik.



6. ábra. Helikopter forgószárnylapát felépítése: 1. Rekeszközi betét, 2. Sejtrácsos töltőanyag, 3. Talp, 4. Élettelenítő, 5. Ellensúly, 6. Főtartó, 7. Borda, 8. Borítás és 9. Hátsó hosszmerevítő

4.2. Műanyag kompozit szerkezetű helikopter forgószárny lapátok

A Kamov 26 típusú helikopterek forgószárnylapátjainak a vizsgálatát is elvégeztük, ami műszaki szempontból igen fontos az élettartam növelése érdekében. Hazánkban ezt a helikopter típust a mezőgazdaságban használják. Ezekben, a lapátot a vezérműhöz csatlakoztató gyök és a rezgéscsillapító flutter súlyok készültek csupán fémből. A főtartó laminált üvegvázaz, a borítása üvegszál-erősítésű műanyag, az üreges szárnyprofilt műanyaghabbal töltötték ki. A vizsgált lapátok a következő szerkezeti paraméterekkel rendelkeznek: hosszuk 6,5 m, szélességük 320 mm, súlyuk 11,5 kg. Keresztmetszeti vázlatukat a 7. ábra mutatja be.



7. ábra. Ka-26 helikopter forgószárnylapát felépítése

Feltárható rendellenességek

A használatban lévő repülőeszközök leggyakoribb meghibásodására mutatunk rá az 1. táblázatban, amely összefoglalja a kompozit szerkezeti anyagokban előforduló hibalehetőségeket és azok részletes leírása is kiolvasható. Az előforduló meghibásodásokat amerikai szerzők csoportosították [6] és ennek a tematikának a segítségével tárjuk fel az általunk vizsgált forgószárnylapátok hibalehetőségeit, amelyeket az 1. táblázatban foglaltunk össze. A leggyakrabban a gyantában, a ragasztóban dús illetve hiányos területekkel, a felerődésekből származó felszíni sérülésekkel találkozunk, amelyek a belső formakitöltő méhsejt szerkezetek torzulásait okozzák, de a lövészeteken felcsapódó repeszek is zárványként jelennek meg a szektorokban. A szektorok közötti tömítések közé beszivárgott víz sem tud mindig kikerülni onnan a szellőzőnyíláson keresztül, gyakran bekerül a méhsejt szerkezetbe. A lapátok függőleges vagy vízszintes tárolási pozíciójától függően, a víz elérheti a főtartóhoz való ragasztási felületeket, ami kritikus lehet, hiszen ez a ragasztás tartja a felhajtóerőt biztosító szektorokat. Télen kell különös körültekintéssel lenni erre a problémára, hiszen a víz beszívároghat és megfagyhat a ragasztási felületen, ha a hibát nem észlelik, akár végzetes baleset is vezethet.

Hiba	Leírás
Rétegelválás	Rétegelválás, egy réteg lapjainak elválása, oka a helytelenül előkészített felület, szennyeződés és idegen anyag beágyazódása.
Bezáródás	Bezáródás, ha idegen anyag beágyazódik, vagy a réteg közé kerül.
Üreg és porozitás	Üreg és porozitás befogott levegő és gázbuborék, okai; párolgó anyagok, a gyanta szennyezett repedése és egyenlőtlen eloszlású nyomás. Üregek gyűlnek össze a gyantában, mivel zacskók vannak a szilárd anyagban.
Gyantában gazdag	Gyantában gazdag behatárolt rész, megtöltve gyantával vagy szálakban

terület	hiányos. Ezt a hibát helytelen tömörség, vagy szivárgás okozza.
Gyantahiányos terület	Gyantahiányos terület, elégtelen gyantával behatárolva nyilvánvalóan száraz folt, vagy fénytelen, vagy látszanak a szálak.
Szálak rossz egyezése, gyűrődés, deformáció	Szálak rossz egyezése, elferdülés a rétegződésben, amely eltér a kívánt elhelyezéstől, vagy a szálak gyűrődése és deformációja. Ezt a hibát helytelen elhelyezés és kezelés okozza.
Száltörés	Törött szálak megszakítottak vagy rosszul elhelyezettek oka helytelen kezelés, vagy elhelyezés
Elválás	Elválás különböző részek között történik a több elemből álló szerkezeteknél. Kötéshiányt a felület szennyeződése, túlzott nyomás, vagy rossz illesztés okoz.

1. táblázat Kompozit szerkezetek hibáinak leírása

5. Mérések

Célunk tehát minél pontosabb és biztonsági szempontból fontos állapot-felmérést készíteni és leírást adni, az általunk vizsgált forgószárnylapátok állapotáról. Munkánk során azt láttuk, hogy az alkalmazott neutron- és röntgen radiográfiai mérések alkalmasak a fém- és a műanyag kompozit anyagokból készült forgószárnylapátok komplementer vizsgálatára. A következő alfejezetekben a kapott eredményeket mutatjuk be.

5.1. Fém kompozit szerkezetű helikopter forgószárnylapátok mérése

A fém kompozit szerkezetű lapátok vizsgálatára alkalmazott radiográfiai mérések eredményeként információt kapunk a lapátot felépítő szektorok belső szerkezetének állapotára vonatkozóan. Elsőként a digitális radiográfia nagyfelbontású képfelvevő eszközét alkalmaztuk, az Imaging Plate technikát. Kétféle lemez méretet használtunk, 200x250 és 20x40 mm²-t, mindkettő dinamikája 16 bit volt, a pixel mérete pedig 50x50 mikron. A képek kiolvasására BAS 2500 típusú letapogatót használtunk, a képek 40 -, illetve 60 MB kiterjedésben kerültek rögzítésre.

A digitális röntgen radiográfiai mérés során BAS MS 200x400 típusú, 200x400 mm² méretű röntgensugárzásra érzékeny IP lemezt használtunk. A 8. ábrán a vizsgált lapátrészletet láthatjuk, a két szektorhatárolót és annak környezetét, jól megfigyelhető a méhsejtrácsos töltőanyag, valamint a főtartó részletes felépítése.

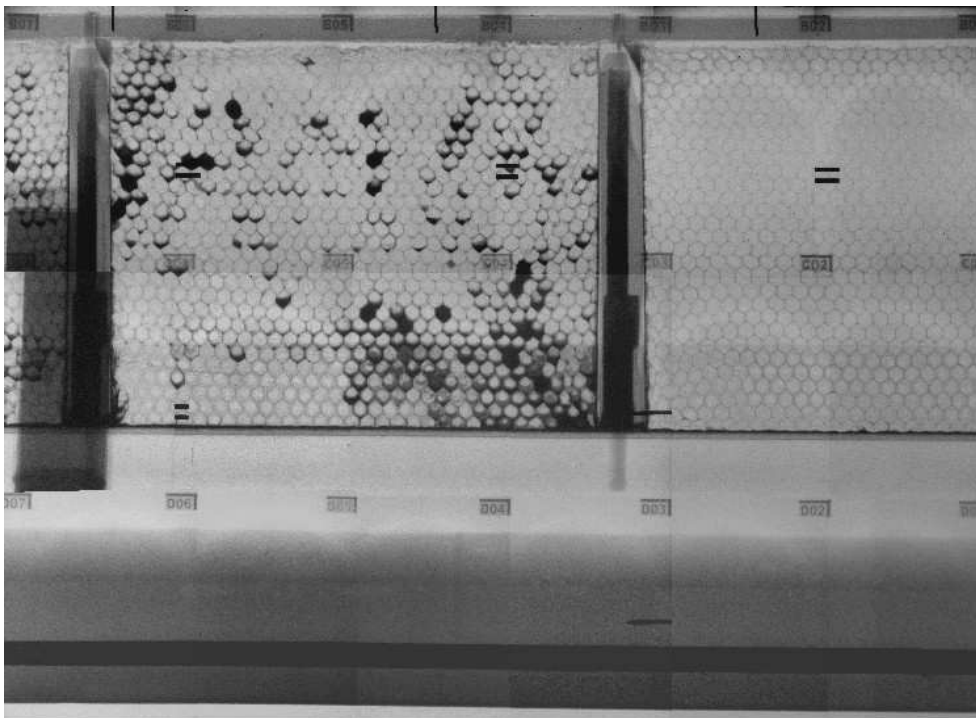


8. ábra. Mi-2 helikopter rotorlapát részlet röntgen-radiográfiai képe

Az ábrán látható szám-kódos jelzések a felvételi képmezők azonosítására szolgálnak, a lapátok mezőnkénti letapogatása nagyfokú precizitást igényelt, ezek segítségével tudtuk megkomponálni az egész lapát radiográfiai képét. A XR képen a szektorhatárolók szomszédságában lévő méhsejtrács elváltozása figyelhető meg. Egy egész szektort figyelve azt látjuk, hogy sötét foltok vannak jelen, az alsó felét tekintve, a főtartóhoz kapcsolódva növekszik a sötét foltok száma, míg a felső félben elszórtabban jelennek meg. A sötét foltok a víz beszivárgásnak a következményei, az el nem párolgó és ki nem folyó víz bekerül a méhsejtrács szerkezetbe, ahonnan nem tud távozni. A szektor alsó felében tapasztalt több sötét folt azt jelzi, hogy a bekerült víz lefolyt és a főtartóhoz kapcsolódó felületen gyűlt össze. A felvétel alján jól láthatók a jégtelenítő rendszer fűtővezetékei, amelyek az ellensúly fölött helyezkednek el. A jégtelenítő rendszernek igen fontos szerepe van, ezért vizsgálata körültekintést igényel. Az XR felvétellel részletes információt kapunk a kiegyenlítő súlyok állapotáról anélkül, hogy szét kellene szedni a lapátot.

A neutron radiográfiai mérés során, neutronsugárzásra érzékeny IP lemezt használtunk, amely BAS ND 20x25 típus jelzéssel rendelkezett és mérete $200 \times 250 \text{ mm}^2$ volt. A 9. ábrán a részben már tárgyalt szektor neutron radiográfiai képét láthatjuk. Azt tapasztaljuk, hogy a víz beszivárgás alkotta hibákat sokkal élesebben látjuk, ami alátámasztja a neutron radiográfia használatának előnyét, hiszen rendkívül pontos információkat kapunk a hidrogéntartalmú anyagok okozta hibákról. Jóval nagyobb mennyiségű vizet figyelhetünk meg, mint az előzőleg rögzített XR felvételen. Aggodalomra ad okot ez a vízmennyiség, hiszen nagyobb roncsolást eredményezhet, pl. fagypon alatti hőmérséklet alatt, jéggé

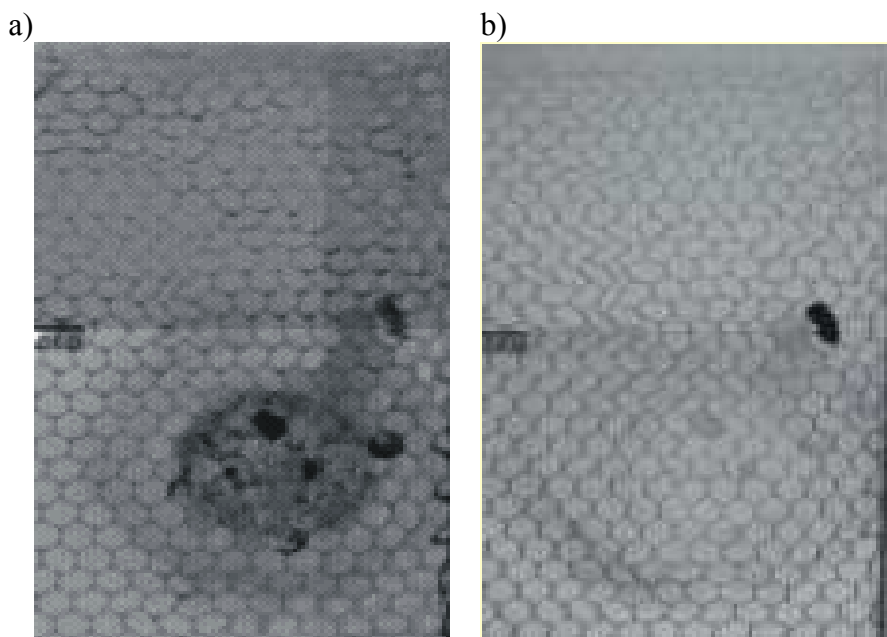
válva, ami a ragasztási felületeket tönkreteszi. A szektorok egymáshoz való illesztése tömítő anyaggal történik, nyomon követhető a tömítő felületek épsége.



9. ábra. Mi-2 helikopter rotorlapát részlet neutron-radiográfiai képe

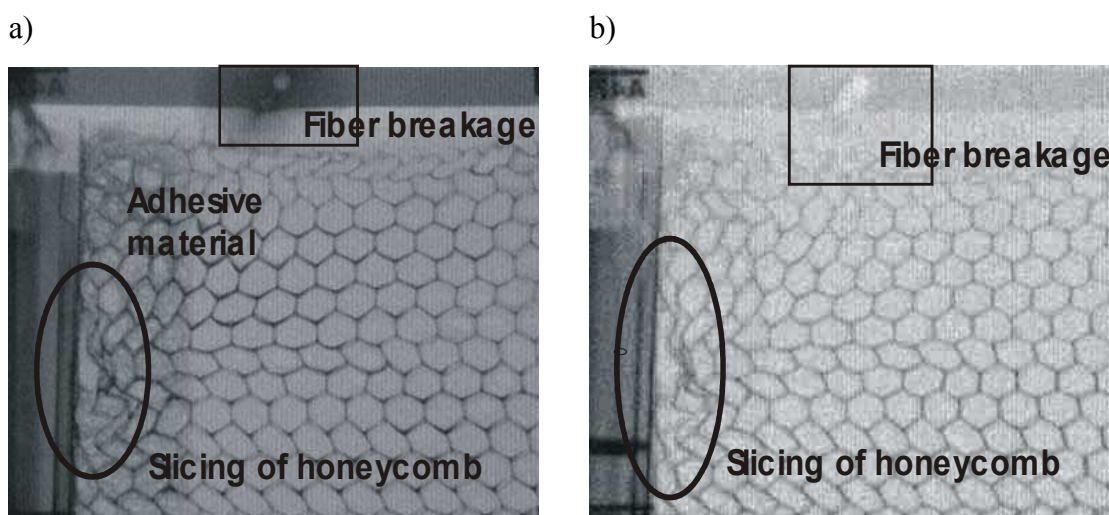
A 10. ábrán javítás után látjuk a szektort kitöltő méhsejtrács neutron- és röntgen radiográfiai képét. Megtaláltuk a felcsapódó fém-szilánkok beágyazódása okozta hibát, ennek javítása utáni felvételét mutatjuk be. A 10.a) ábrán a neutron radiográfiai kép alsó felében nagyterjedésű javítási gyantafoltot láthatunk, valamint a javítási pontok is halványan kirajzolódnak, a fém-szilánkok okozta sérüléseket gyantával való kitöltéssel javították ki. A kép baloldalán, középen a képmezők azonosítására használt jelölés látható. A kép jobbközepén egy elmosódott sötétebb folt figyelhető meg, ami jól látható módon külső hatásra került a szerkezetbe, nem része a méhsejtrácsnak.

A 10.b) ábrán a röntgen radiográfiai képet látjuk, a kiterjedt gyanta folt eltűnik a neutron radiográfiai képhez viszonyítva, viszont a jobbközépen nagyon erős kontraszttal kimutatható az a fekete folt, ami a szerkezetbe csapódó fémszilánkot mutatja meg. A XR méréssel pontosabban meghatároztuk a felcsapódást követő fém beágyazódást, ezzel információt tudunk adni a mindenkori fémalkatrészek okozta sérülésekről, aminek felderítése és javítása nagymértékben megnöveli a lapát élettartamát és biztonságos használatát.



10. ábra. Repesz behatolási sérülés javítás utáni neutron (a) és röntgen (b)-radiográfiai képei

A 11. ábrán a rekeszbordához ragasztott méhsejtrács erős torzulására kapunk információt. A neutron- és röntgen radiográfiai méréseket, a kilépőél javításának minőségellenőrzésére végeztük. A 11.a) kép felső közép részében látható a kilépőél javítása utáni felvétel, a javítást az anyaghiány gyantakitöltésével oldották meg. A 11.b) ábrán a röntgen radiográfiai képét láthatjuk, hogy a kilépő él sérülése figyelhető meg ezen a felvételen, követhető a sérült üvegtextolit anyag hiányossága. Mivel a neutron radiográfia érzékenyebb a hidrogént tartalmazó anyagok észlelésére, ezért látjuk élesebben a kisebb sűrűségű javítási gyantafoltot a neutron radiográfiai képen.

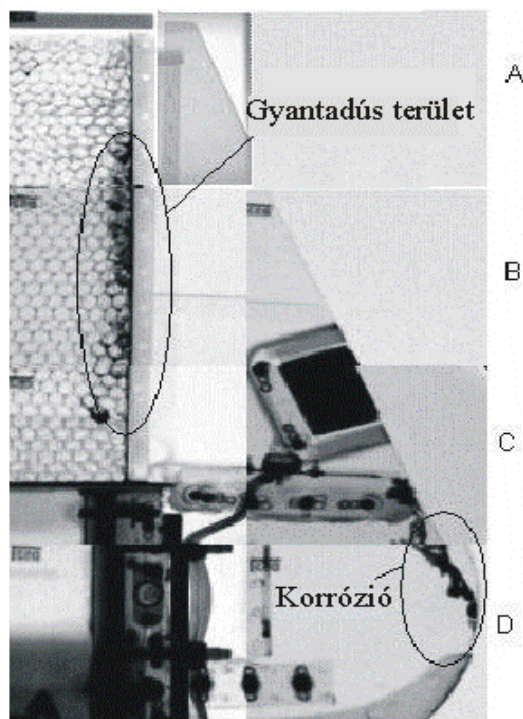


11. ábra. Kilépőél javítás NR (a) és XR (b) képei

A fém kompozit szerkezetek hibái kimutathatók neutron- és röntgen radiográfiai módszerekkel, a bemutatott vizsgálatoknál láttuk, hogy a hibák feltárására mindkettőt érdemes elvégezni. Azonban azt is láhattuk, hogy a nagyobb rendellenességek mindkettővel megtalálhatók, ez azért is fontos, mert

nem minden esetben tudunk komplementer vizsgálatot végezni, de a hibákat a repülés biztonság érdekében meg kell találni. Ezért ha nem is vagyunk egy reaktor közelében, ami lehetőséget biztosít a neutron radiográfiai mérésekre, azért egy hordozható és telepíthető röntgen radiográfiai készülékkel, akár a helyszínen is elvégezhetők az elsődleges, és némely esetben, elégséges vizsgálatok, úgy mint a nagy mennyiségű víz kimutatása, fém szilánkok becsapódása, jégmentesítő fűtésvezetékek állapotvizsgálata.

Megvizsgáltuk a helikopter forgószárnylapátokat felépítő szektorok belső szerkezetének az állapotát, azonban még egy fontos alkatrész esetleges hibalehetőségeit kell megvizsgálnunk, amely a lapát leginkább igénybevett része. A lapátot lezáró végelem neutron radiográfiai képét láthatjuk a 12. ábrán. A neutron radiográfiai mérés során a képalkotási síkban lévő ZnSAg/Li⁶ tartalmú szcintillációs lemez alakítja fénné a neutron nyaláb alkotta képeket, amelyeket nagyérzékenyséű TV kamera tesz láthatóvá. A CCD kamerával készült digitális felvételeket ez esetben a PULSAR program segítségével értékeltük ki. A végrekeszt lezáró elem 8 felvételi képmezőre van felosztva, a jobb megfigyelés és azonosítás céljából. Az A, B, C és D vízszintes sávjelölést véve alapul, azt mondhatjuk, hogy az A-B-C sávok első felében hosszanti gyantadús méhsejtsoport figyeltünk meg az utolsó szektor végén. A C-D sáv második felében a fém lezáró elem belsejében korróziós terméket azonosítottunk.



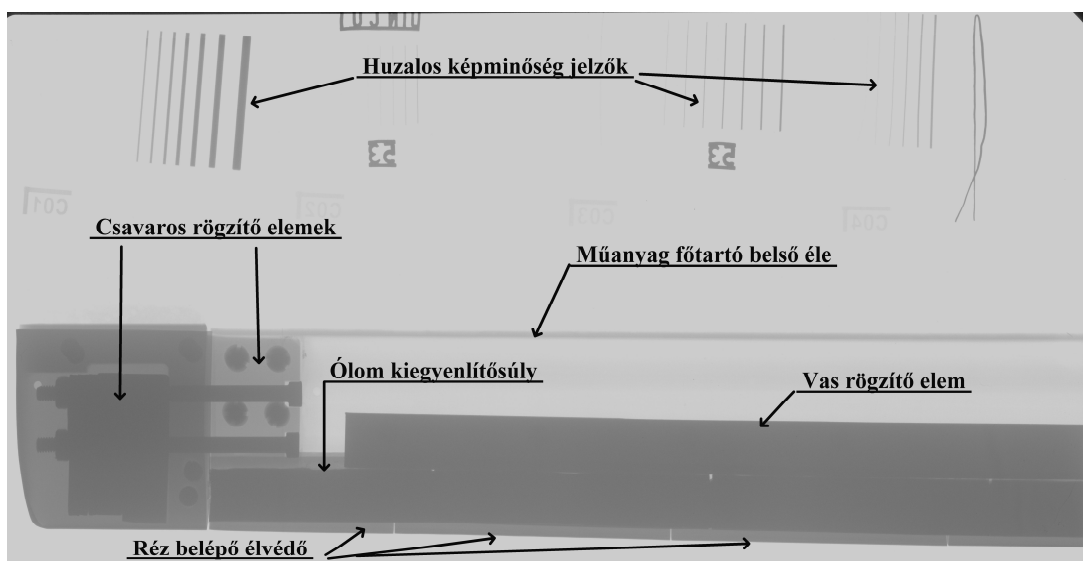
12. ábra. A rotorlapát vég elemének neutron radiográfiai képe

5.2. Műanyag kompozit szerkezetű helikopter forgószárny lapátok mérése

A műanyag kompozit szerkezetű helikopter forgószárnylapátok vizsgálatánál, szintén neutron- és röntgen radiográfiai méréseket alkalmaztunk a Budapest 10 MW teljesítményű kutatóreaktornál.

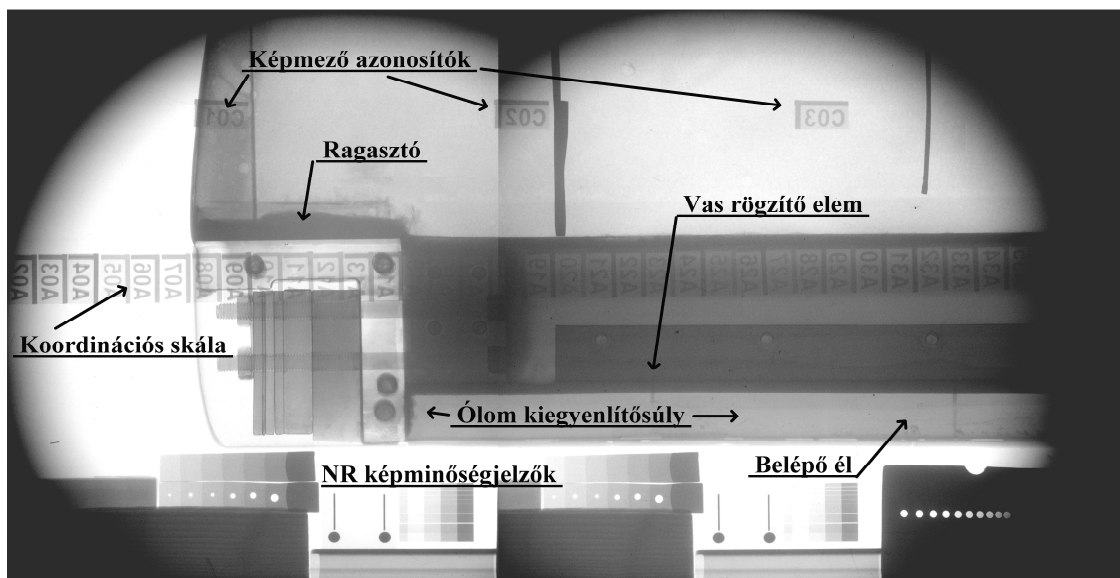
A digitális röntgen radiográfiai mérés során, a BAS MS 20x40 jelzésű, 200x400 mm² kiterjedésű röntgensugárzásra érzékeny IP lemezt használtuk. A 13. ábrán a Ka-26 helikopter

forgószárnylapátjának végelemét látjuk. Előző vizsgálatainkkal összevetve, nagyon eltérő képet kapunk, a fém- és műanyag kompozitok nagyfokú eltérése jól megfigyelhető. A műanyag alapú kitöltés alig érzékelhető, ez a kép felső részét alkotja, itt jórészt csak a huzalos képminőség jelzők láthatók. Azonban pontosan kirajzolódnak a képminőség jelző fémhuzalok és a fémkomponensek a radiográfiai kép alsó részében. A kép vizsgálata azt mutatja, hogy a fém alkatrészek állapotáról nagyon pontos leírást adhatunk. Megfigyelhetjük a műanyag főtartó belső éle alatti rögzítő elemeket, a kép baloldalán a csavaros rögzítő elemekről kapunk információt, innen kiindulva a vas rögzítő elem hosszanti vizsgálatát tudjuk elvégezni, amely egész élesen rajzolódik ki. Ugyanitt figyelhetjük meg az ólomból készült kiegyenlítő súly elhelyezkedését, valamint a rézből készült belépő élvédőket.



13. ábra. Ka-26 helikopter rotorlapát vég elemének röntgen radiográfiai képe

A neutron radiográfiai mérések során 100 mm vastag ólom szűrőt alkalmaztunk, a sugárnyaláb intenzív gamma-sugárzás tartalmának káros hatásának elkerülésére (kb. 8,3Gy/h). Ez esetben neutronsugárzásra érzékeny IP lemezt használtunk, amely BAS ND 20x25 típus jelzéssel rendelkezett és a mérete: 200x250 mm². A 14. ábrán a Ka-26 gép forgószárnylapát végelemének neutron radiográfiai képe látható, és az előző képhez viszonyítva, szembeötlő a különbség. A kép felső részében a képmező azonosítók láthatók, majd a műanyag főtartó és az alatta elhelyezkedő fémrögzítők rajzolódnak ki. A rögzítésnél megfigyelhető a ragasztási felület. Alatta látható a koordinációs skála, amely a geometriai eligazodást könnyíti meg. Sokkal élesebben elkülönül az ólom kiegyenlítő súly a vas rögzítő elemtől, amelyek az XR esetén homogén képként voltak láthatók. Előbbi világosabb képet adva, míg a vas rögzítő elemre sötét kirajzolódás jellemző. Az ólom kiegyenlítő súly ragasztva van a főtartóhoz, ezt a ragasztást is ellenőrizni tudjuk. A belépő él alatt a NR képminőség jelzők láthatók.

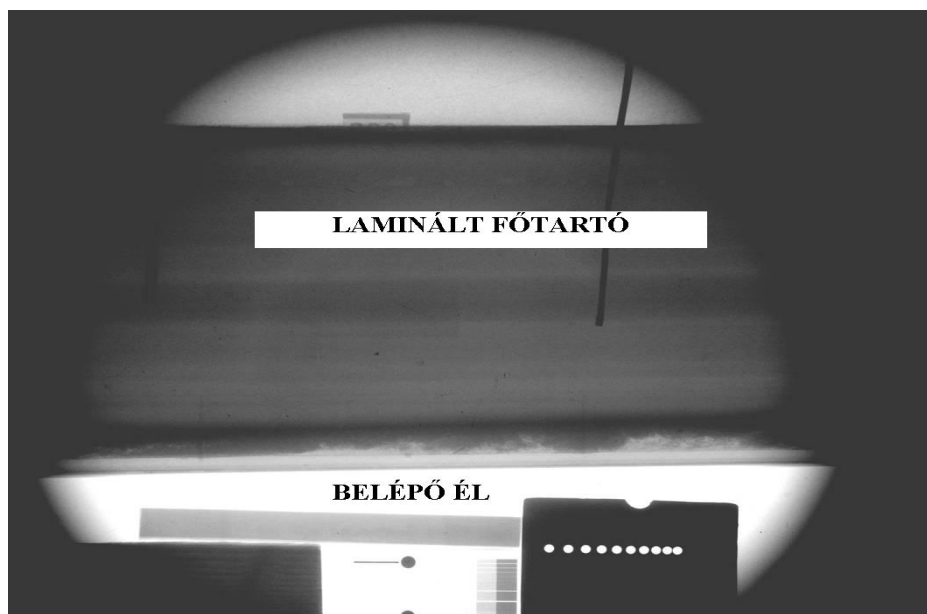


14. ábra. Ka-26 helikopter rotorlapát vég elemének neutron radiográfiai képe
 A fent bemutatott neutron radiográfiai módszerrel vizsgáltuk a főtartót és a rajta elhelyezkedő szektorsorozatot. Azt látjuk a 15. ábrán, hogy a C24-es képző jelölés alatt, valamint a rekeszközi borda mindkét oldalán, szimmetrikusan a bordához képest, a főtartó és a szektorok illeszkedésénél elvállás alakult ki. A kép alsó felén szintén a koordinációs skála van feltüntetve, valamint a NR képmínőségjelzők láthatók.



15. ábra. Szektor és főtartó közötti elvállás NR képe egy Ka-26 rotorlapátban

A 16. ábrán a Ka-26 rotorlapát belépő él részletének neutron radiográfiai képét mutatjuk be. A lapát belépő élében elhelyezkedő ólom kiegyenlítő súly kitöltési hiányosságát figyelhetjük meg, amelyet az okozott, hogy a sárgarézből készült kilépő élvédő rögzítésére használt ragasztó, részlegesen feloldotta helyenként az ólom kiegyenlítő súlyt, ami hosszú távon veszélyes sérülésnek minősül.



16. ábra. Egyenlőtlen eloszlású kiegyenlítő súly részlet NR képe egy Ka-26 rotorlapátban

5. Teljes helikopter forgószárnylapátok radiográfiai képének előállítása

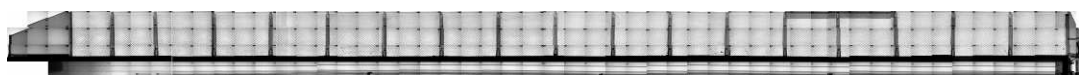
A helikopter forgószárnylapátokon száraz és nedvesítés utáni állapotban végeztünk neutron és röntgen radiográfiai méréseket, átlagosan egy lapát vizsgálata 636 db képmező felvételén keresztül történik. Ezek tartalmazzák az összes általunk észlelhető eltérést. Ahhoz, hogy a pontos állapotmeghatározást végre tudjuk hajtani, szükség van a teljes forgószárnylapát radiográfiai képeinek megkomponálására. A 17. ábrán a ROTOR PUZZLE feladatorientált soft-ware [7] segítségével összerakott teljes radiográfiai képegyüttest mutatjuk be.



Teljes forgószárnylapát száraz NR képe (a)



Teljes forgószárnylapát nedves NR képe (b)



Teljes forgószárnylapát nedves XR képe (c)

17. ábra. Teljes forgószárnylapát radiográfiai kép együttese.

6. Összefoglaló

Munkánk során a KFKI Atomenergia Kutatóintézet Budapest kutatóreaktoránál, az MH RMSZF és a HM Technológiai Hivatal felkérésére állapot meghatározást végeztünk Mi-2, Mi-8, Mi-17 és Mi-24 helikopter fémkompozit szekezetű forgószárnylapátokon. A Ka-26 helikopterek műanyagkompozit

szerkezetű anyagból készült forgószárnylapátok vizsgálatát is elvégeztük. A szerkezet állapotának meghatározásra digitális neutron- és röntgen radiográfiai méréseket alkalmaztunk. A méréseinknél kétféle digitális jelrögzítési módszert használtunk, az imaging plate (IP) technikát és nagyérzékenységű CCD kamera alkalmazásán alapuló képrögzítési technikát. A neutron radiográfiai mérések segítségével kimutattuk: a rekeszekbe bekerült vizet és annak eloszlását, a főtartó és szektorok közötti ragasztást, a gyantadús területeket és a felverődött fémalkatrészek helyét, valamint a korrózió megjelenésének helyét. A röntgen radiográfiai mérésekkel, választ kaptunk a nagy kiterjedésű vízbehatolásra és a fém-alkatrészek állapotára.

A két radiográfiai mérési technika egymást kiegészítve ad hibajelzést, úgy a fém- mint a műanyagkompozit szerkezetű helikopter forgószárnylapátok belső szerkezetében kialakult eltérésekről. A hibák azonosításával és kijavításával nagyban megnövelhetjük a lapátok élettartamát.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] BALASKÓ Márton and SVÁB Erzsébet, Dynamic Neutron Radiography Instrumentation and Applications in Central Europe, Nucl. Inst. and Methods in Physics Research, A377140 (1996).
- [2] DOMANUS I. C., Practical Neutron Radiography Edited by I. C. Domanus, Kulwer Academic Publisher 1992.
- [3] BALASKÓ Márton, G. Endrőczy, J. Veres, Gy. Molnar, F. Körösi, Research of extension of the life cycle of helicopter rotor blade in Hungary. Proc. NATO conference for Applied Vehicle Technology Panel (AVT), Manchester October 7-11, RTO-MP-079(II) ISBN-837-1089-4, 2003, pp. SM 39.1-30.15
- [4] BALASKÓ Márton, I. Veres, Gy. Molnár, Zs. Balaskó, E. Sváb: Composite structure of helicopter rotor blades studied by neutron- and X-ray radiography, Physica B, 350, 2004, pp. 107-109.
- [5] BALASKÓ Márton, SVÁB Erzsébet, I. Veres, Gy. Molnár: Classification of defects in honeycomb composite structure of helicopter rotor blades, Nuc. Inst. and Method A542, Is. 1-3, 21, 2005, pp. 45-51.
- [6] SEM J.K. and EVERETT R. A., In: RTO/NATO, ISBN 92-837-1051-7, 2000, pp. 5.5.21.
- [7] BALASKÓ Márton et al, Composition of radiography pictures of whole helicopter rotor blades in Hungary, 7th WCNR Rome, 15-20. September 2002.