

Örvényáramú anyagvizsgálat

Tóth Ferenc*

Bevezetés

A roncsolásmentes anyagvizsgálat egyik fontos és széles körben elterjedt módszere a vizsgálandó tárgyban keltet örvényáramok mérésén alapszik. Az eljárás gyors és viszonylag olcsó, alkalmas különféle alapanyagok azonosítására és szétválogatására, felületi vagy rejtett hibák felderítésére, technológiai folyamatok ellenőrzésére. Az örvényáramú vizsgálat könnyen automatizálható, a mérési eredmények kiértékelése számítógépesíthető, ezért használatuk a kohászat, a gépipar, a jármű- és repülőgépipar, gáz- és olajszállítás, valamint az atomipar terén egyaránt mind szélesebb körben terjed. Az örvényáramú vizsgálati eljárás elméletileg és kísérletileg jól megalapozott, a berendezések továbbfejlesztésével, gyártásával számos intézmény és vállalat foglalkozik szerte a világon, és kétségtelen, hogy az ipari modernizálás és automatizálás nélkülözhetetlen eszközévé vált.

Az örvényáram egyaránt alkalmas különböző alakú és méretű tömbök, lemezek, fémkatrészek felületi és felület alatti hibáinak (repedések, zárványok, üregek, korrózió stb.) kimutatására, méreteellenőrzésére, bevonatok rétegvastagságának mérésére, anyagjellemzők (keménység, vezetőképesség, ötvözők hatása) meghatározására.

A vizsgálat érintés nélkül, nagyon gyors, használata viszonylag könnyen elsajátítható.

A felsorolt előnyök ellenére a módszer mégsem terjedt el olyan széles körben, amint az indokolt lenne. Mellőzöttségének több oka van; ezek: a működési elv nem megfelelő ismerete, a hozzáférhető berendezések fogyatékosai, a kijelzett értékek nehézkes értelmezhetősége, korábbi sikertelen próbálkozás után szerzett kedvezőtlen tapasztalatok alapján kialakult ellenérzés, amiért inkább más, jól megalapozott vizsgálati eljárást választanak, többnyire ultrahangos vagy röntgen vizsgálati metodikát.

Kívételt képez ez alól a repülőgépipar és a légiközlekedés, ahol a módszer régóta széles körben általánosan használt mind az alapanyagok azonosítására, minőségellenőrzésre, mind az időközi biztonsági felülvizsgálatok terén. Ez azzal magyarázható, hogy az ott elvárt vizsgálati követelmények egyértelműen értelmezhetők, a kijelzések zavarmentesek, félrevezető változókkal nem kell számolni. Az elektromos vezetőképesség alapján a felhasználásra kerülő alumíniumötvözetek szétválogathatók, gépelemek anyaghibái könnyen kimutathatók, amelyeknek mibenléte nem igényel különösebb kiértékelést, nem okoz értelmezési zavart.

Az elmúlt 10-15 év során végbement fejlődés következtében a berendezések kezelése nagymértékben egyszerűsödött, érzékenysége növekedett. A vizsgálatok robotizálásával, a számítógépes kiértékeléssel a szubjektív tévedések kizárhatóak. A legváltozatosabb feladatokra kidolgozott speciális vizsgálati szondák révén a módszer számos olyan területen is sikeresen használható, ahol arra régebben nem volt lehetőség.

Az örvényáramú vizsgálati eljárás bevezetése előtt – hasonlóan más roncsolásmentes módszerekhez – célszerű nemcsak alkalmazási lehetőségeit, hanem annak korlátait is figyelembe venni. Egyes hibatípusok pl. a kis méretű repedések durva, egyenetlen felületen nem vagy csak alig észlelhetők, hasonlóan az ultrahangos vizsgálatokhoz.

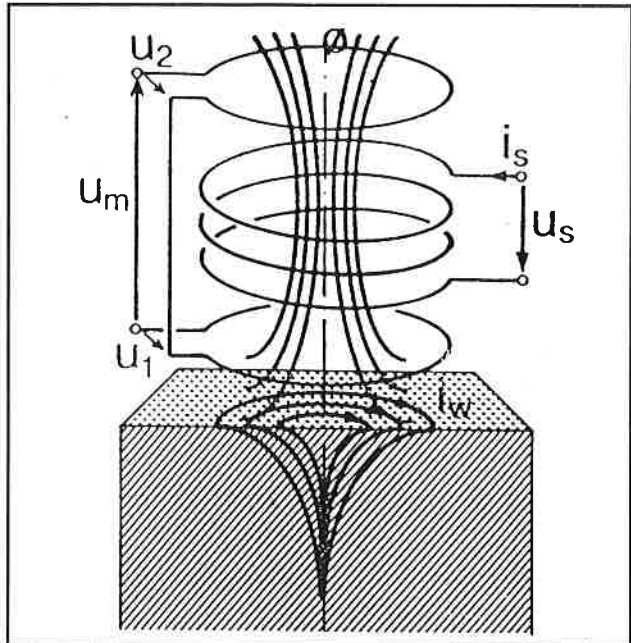
Az örvényáramú vizsgálatok tényleges lehetőségeinek és korlátainak pontos ismeretében el lehet kerülni az értelmezhetetlen mérési eredményeket, a más módszerekkel kapott adatokkal ellentétben álló következtetéseket.

Az örvényáramú vizsgálat alapelvei

Az örvényáramú anyagvizsgálat ma már elméletileg is jól alátámasztott, számos kísérleti-kutatási eredmény felhasználásával jutott el jelenlegi fejlettségi szintjére. Részletes ismertetése sok kézikönyvben megtalálható [1, 2, 3, 4]. A módszer iránt érdeklődők könnyebb tájékozódása végett néhány leegyszerűsített alapvető röviden érintünk.

Váltóárammal táplált tekercs mágneses tere a közelébe került fémtárgyban örvényáramokat kelt (1. ábra). Az örvényáramok tere ellentétes

irányítottágú a mérőtekercs saját terével, ezért azt részben kioltja, aminek következtében megváltozik a tekercs áramának mind az amplitúdója, mind a fázisszöge a gerjesztést létrehozó generátor jeléhez viszonyítva.



1. ábra. Váltóárammal (i_s) gerjesztett mágneses fluxus Φ , a fémtestben keletkező örvényáramok (i_w) és ezek megváltozásából eredő jelfeszültség (U_m)

Az örvényáram intenzitása, értékének csökkenése a fém belseje felé az alapanyagra jellemző elektromos vezetőképességtől (vagy fajlagos ellenállástól), a permeabilitástól, valamint a mérőtekercsben folyó áram frekvenciájától függ. Azt a felülettől mért távolságot, amelynél az örvényáram a felületi áramhoz viszonyítva 36,8%-ra ($1/e$ részre) csökken, mértékadó (standard) behatolási mélységnek nevezik. Az anyagban ilyen mélyen fekvő hiba kimutathatóságának érzékenysége természetesen ugyanilyen arányban csökken. A mértékadó behatolási mélység (δ) függése az anyagjellemzőktől és a mérőfrekvenciától:

$$\delta = 50 \cdot [\rho / (f \cdot \mu_r)]^{1/2}, \text{ (mm)} \quad (1)$$

ahol ρ a vizsgált anyag fajlagos ellenállása ($\mu\Omega \cdot \text{cm}$)-ben és μ_r a relatív permeabilitása, illetve f a mérőfrekvencia (Hz)-ben.

A 3δ mélységet, ahol az örvényáram 5%-ra esik, tekintik a hiba detektálhatósági küszöbszintjének. Ha az alapanyag ferromágneses, abban az anyagra jellemző permeabilitás arányában nagyobb mágnesesítetttség jön létre és ennek megfelelően csökken a behatolási mélység is. Vas- és acélféleségek relatív permeabilitása kb. tíztől több százig terjed, ezért azonos mélységű hibák kimutatásánál a mérőfrekvenciát a permeabilitás értékének megfelelően csökkenteni kell.

Az örvényáram nagyságának függése a felülettől mért távolságtól azt jelenti, hogy egy adott hiba által okozott áramváltozás értéke is mélységfüggő: nagy méretű belső hiba jele megegyezhet egy kis méretű felületen lévő hiba jel nagyságával, azaz a kijelző műszer amplitúdóváltozása nem különbözteti meg egymástól a kétféle hibatípust.

A korszerű mérőberendezések a mérőáram amplitúdóváltozásán kívül kijelzik az áram fázisszögének eltolódását is, amely a mélységgel arányosan lineárisan növekszik a következő összefüggés szerint:

$$\beta = \frac{x}{\delta}, \text{ (rad)} \quad (2)$$

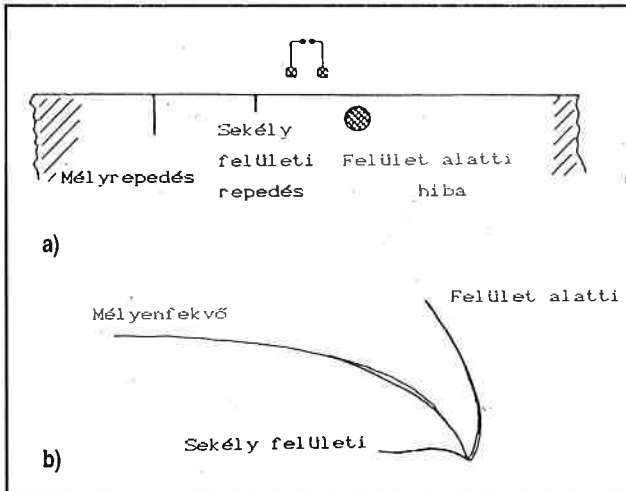
ahol x a felülettől mért távolság és δ az (1) szerinti megadott mértékadó behatolási mélység mm-ben. A mértékadó behatolási mélységnél a fá-

* MTA KFKI Szilárdtestfizikai Kutató Intézet, Budapest

zisszögeltelődés (késés) kereken 57° , kétszeres mértékadó mélységnél: 114° .

A mérőjel amplitúdója tehát a hiba méretével, az amplitúdóváltozás fázisszöge viszont a hiba mélységével arányosan változik, ezért a felületi és az anyag belsejében lévő hibák ténylegesen egymástól megkülönböztethetők.

A 2. ábra alumíniumlemezben előforduló tipikus hibákat, illetve azok vektorszókos megjelenítésű örvényáramú jeleit szemlélteti. A különböző méretű repedések szemmel láthatólag amplitúdóban és fázisban jelentősen eltérnek egymástól; a mélyen fekvő zárvány jelei úgyszintén elkülöníthetők a repedés jeleitől.



2. ábra. Vastag alumínium felületi sekély és mély repedéseinek, és a felület alatti hibájának vektorábrája abszolút mérőtekerccsel mérve

A mérőfrekvencia megválasztása

A mérőfrekvencia megválasztása döntő fontosságú, mivel ez határozza meg egyrészt a vizsgálati mélységet, másrészt erősen függ tőle az elérhető érzékenység. Általános szabály, hogy az anyagra jellemző mértékadó behatolási mélységgel azonos a ténylegesen vizsgált tartomány. Így meghatározott frekvenciánál alacsonyabb mérőfrekvencia nagyobb behatolási mélységre, de kisebb detektálási érzékenységet eredményez, rosszabb a felületi, illetve a felület alatti hibák szétválasztása. Magasabb frekvenciáknál az érzékenység jelentősen megnő, de az anyag belsejében lévő hibák nem mutathatók ki.

Az (1) és (2) kifejezések alapján számított behatolási mélység és fázisszögeltelődés csak nagyon vastag tárgyakra és lapos, sík mérőtekerccseknél pontos. Változó geometriájú munkadaraboknál, tipikus – koncentrált terű – mérőtekerccseknél az örvényáram tényleges értéke a számítottnál általában gyorsabban csökken, ezért ilyen vizsgálatoknál a mérőfrekvenciát némileg csökkenteni kell.

A gyakorlatban lemezek és csövek hibáinak keresésénél empirikus úton meghatározott összefüggést használnak. Lemezeknél az az optimális mérőfrekvencia, amelynél a hibajelek és a lemez vastagságingadozásából, valamint a mérőszonda és a lemez közötti távolság ingadozásából (lift-off) adódó fáziskülönbség 90° , a következő

$$f_{90} = 1,6\rho/x^2, \quad (\text{kHz}) \quad (3)$$

ahol ρ ismét az anyag fajlagos ellenállása, ($\mu\Omega\cdot\text{cm}$)-ben, és x a lemez vastagsága mm-ben.

Csöveknél az a frekvencia, amelynél a külső és belső felületen levő hibák jelei között a fáziskülönbség 90° , a következő:

$$f_{90} = 3\rho/x^2, \quad (\text{kHz}) \quad (4)$$

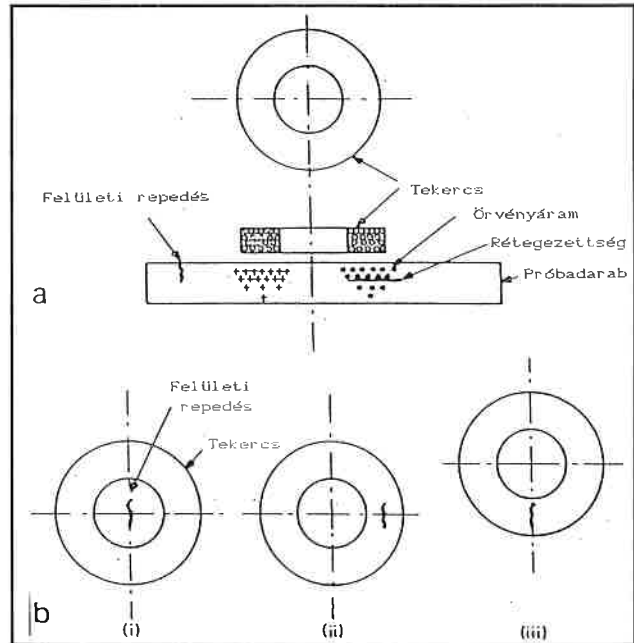
Ha az örvényáramot nem hibakeresésre, hanem pl. vastagságmérésre, a bevonat rétegvastagságának meghatározására használjuk, a mérőfrekvenciát a mértékadó behatolási mélységből meghatározott értéknek mindig lényegesen magasabbra kell választani.

Hőcsereleőcsövek tartóinak behatolására, lerakódásainak kimutatására ellenben mindig alacsonyabb frekvencia szükséges azért, hogy a

cső saját örvényáramú jele minél kisebb mértékben járuljon hozzá a keresett effektus hasznos jeléhez.

Mérőtekerccsek

Örvényáramú hibavizsgálat alapfeltétele, hogy az örvényáram útját a detektálni kívánt hiba valamilyen módon megváltoztassa. Az anyagban az áram mindig a tekerccs meneteivel párhuzamosan folyik, ezért nem minden irányítottágú repedés detektálható azonos érzékenységgel. A 3a. ábrán az örvényáramokkal párhuzamos belső repedés alig módosítja az áramok útját, ezért azok alig detektálhatók. A 3b. ábrán a repedés és egy relatíve nagy méretű tekerccs egymáshoz viszonyított helyzetétől függően a detektálás lehet gyenge (i, ii) vagy maximális (iii).

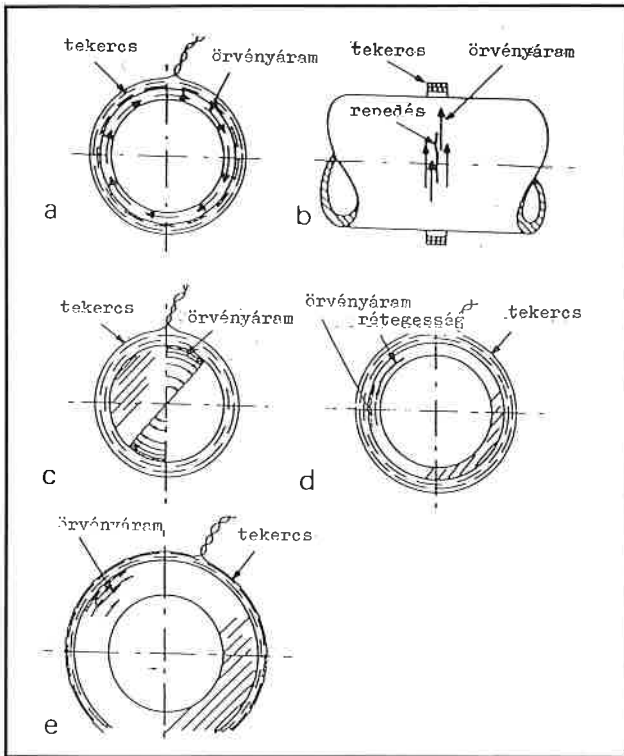


3. ábra. Kis méretű hibák detektálása felületi tekerccsel
a) a belső repedésekkel párhuzamosan folyó örvényáramok nem adnak számottevő jelváltozást;
b) a tekerccs közepére eső hiba (i) és az örvényáram folyásával párhuzamos repedés (ii) nehezen detektálható, míg az örvényáram irányára merőleges helyzetű repedés (iii) adja a legnagyobb érzékenységet

Hasonlóképp, átmenőtekerccses cső- és rúdvizsgálatoknál az örvényáramok párhuzamosak a tekerccs meneteivel (4a. ábra), amely nullára csökken a rúd belsejében (4c. ábra), illetve a mérőfrekvenciától függően az örvényáramok a csőfal meghatározott tartományára koncentrálnak. A keresztirányú felületi repedés, rétegződés ebben az esetben sem változtatja meg az áramok nagyságát, ezért ilyen hibák kimutatására más tekerccselrendezést kell választani.

A vizsgált anyaggal közvetlen kapcsolatban lévő mérőtekerccs minden olyan anyagtulajdonságra reagál, amely megváltoztatja az örvényáram értékét. Ilyenek az elektromos vezetőképesség, a permeabilitás, a geometriai méretváltozások, a különböző anyaghibák. Emiatt ezt a tekerccstípust abszolút mérőtekerccseknek nevezik.

Két – közvetlen egymás mellé helyezett – elektromosan ellenkötött mérőtekerccs (5. ábra) a benne lévő munkadarab vezetőképesség-, permeabilitás- és méretváltozásaira egyáltalán nem reagál. Ha viszont valamelyik tekerccs közvetlen közelében valamilyen hiba megváltoztatja az örvényáramok eloszlását, megváltozik a két tekerccs kiegyenlítetttsége és a változás arányos lesz a hiba méretével. Ezeknél az ún. differenciál mérőtekerccseknél a zavaró mellékhatások kiesnek, növelhető az erősítés, ezért hibadetektálásra az abszolút tekerccsnél érzékenyebb. Az abszolút és differenciál mérési elrendezések előnyeit és hátrányait az 1. táblázat foglalja össze.



4. ábra. Csővizsgálat átmenő tekercsrel

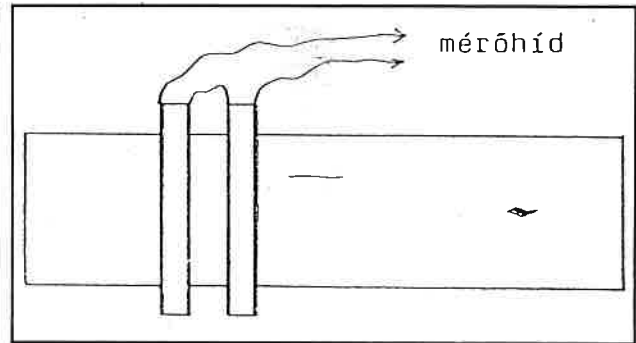
a) a csőben az örvényáram erősségét az anyag vezetőképessége határozza meg; b) a mérőtekercs meneteivel párhuzamosan repedések nem detektálhatók; c) tömör rúd belsejében az örvényáram fokozatosan csökken; d) a tekercsmenetekkel párhuzamos belső repedés nehezen detektálható; e) az örvényáramok a cső külső felületére koncentrálnak,

1. táblázat. A mérőtekercsek alkalmazási jellemzői

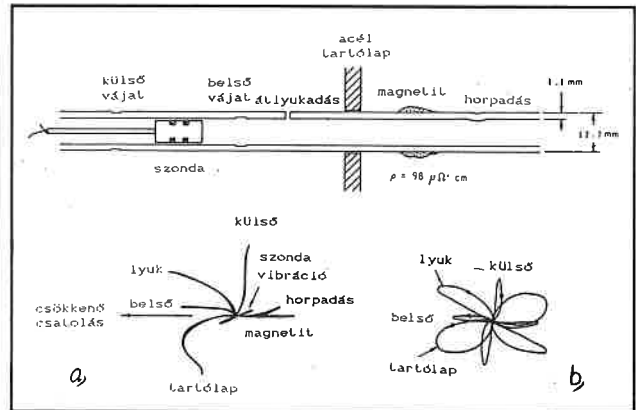
Mérőtekercsek	
abszolút	differenciál
Előnyök	
Folyamatos és hirtelen változó hibákat egyaránt kijelez	Hőmérsékletváltozásra érzékellen
Összetett jelek könnyen értelmezhetők	A szonda rezgésekre érzékellen
A hibát teljes hosszában kijelez	Alapanyag inhomogenitásokra érzékellen
Hátrányok	
Hőmérsékletváltozásra érzékeny	Fokozatosan változó hibákra érzékellen
A szonda elmozdulására, rezgésre érzékeny	Hosszú hibák széleit érzékeli csupán
Alapanyag inhomogenitásra érzékeny	Nehezebben értelmezhető vektorábrát ad

A hőcserélőcsöveknél használatos kalibrációs cső abszolút és differenciál tekercselrendezéssel kapott mérőjelei a 6. ábrán láthatók, amelyek közül némelyik tényleges hibák, mások érdektelen kijelzések [5]. A valódi hibák mérőjeleinek fázisszöge 0° és 90° közé esik, a belső felületi hiba fázisszöge közel nulla, a külső hibáé 90° , az átlukadás pedig a kettő közé esik. Ezek a fázisszögek természetesen nem kötött mennyiségek, a mérőfrekvencia változtatásával a hajlásszögek forgathatók.

Sík felületek kimutatására használt tekercseknél az alapanyag fizikai sajátosságain, a választott mérőfrekvencián kívül fellép egy további – a tekercs geometriájával összefüggő – hatás is, amely erőteljesen csökkenti a tényleges behatolási mélységet. A 7. ábrán lemez-, illetve csővizsgálat átmenő mérőtekercsei körül kialakuló mágneses terek sematikus ábrái láthatók. Csővizsgálatoknál a mérőtekercs keresztmetszete nem tér el nagy mértékben a cső falvastagságától, ezért a tekercs mágneses tere teljesen áthatol a cső falán: a külső és a belső hibák egyaránt detektálhatók.

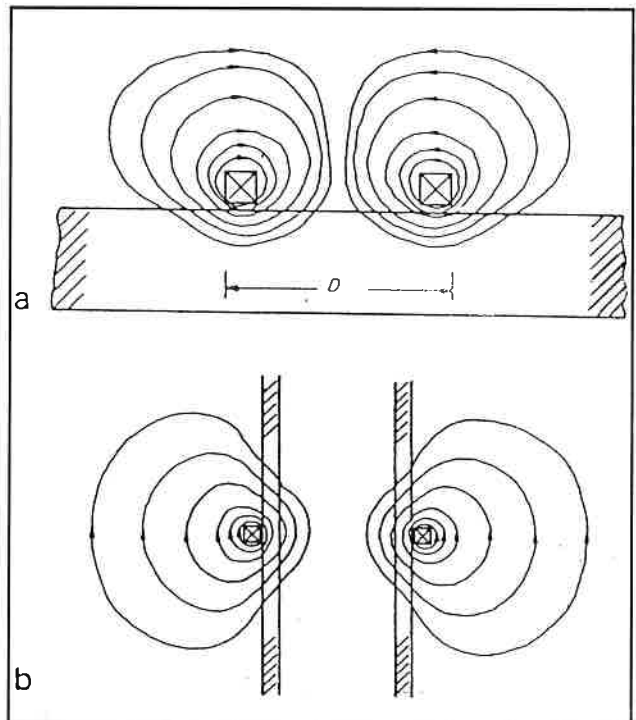


5. ábra. Cső hibavizsgálata két elektromosan ellenkötött mérőtekercsrel



6. ábra. Hőcserélőcső vizsgálatának hitelesítésére szolgáló etalon jellegzetes hibatípusai, valamint azok abszolút (a) és differenciál (b) mérőtekercsrel megjelenített vektorábrái. A tényleges hibák fázisszögei 0° és 90° közé esnek.

Sík tekercsnel a mágneses tér behatolási mélységét nem a tekercskeresztmetszet, hanem a tekercsátmérő (D) határozza meg; a mélység kb. a tekercsátmérő 1/4 részéig terjed. A frekvencia növelésével a behatolási mélység a megszokott módon csökkenthető; de a frekvencia csök-



7. ábra. Lemez- és csővizsgáló mérőtekercsek körül kialakuló mágneses tér. A vékonyfalú cső teljes keresztmetszetét átjárja a mágneses tér (b), vastag lemeznel a mágneses tér nem jut el a lemez közepéig (a).

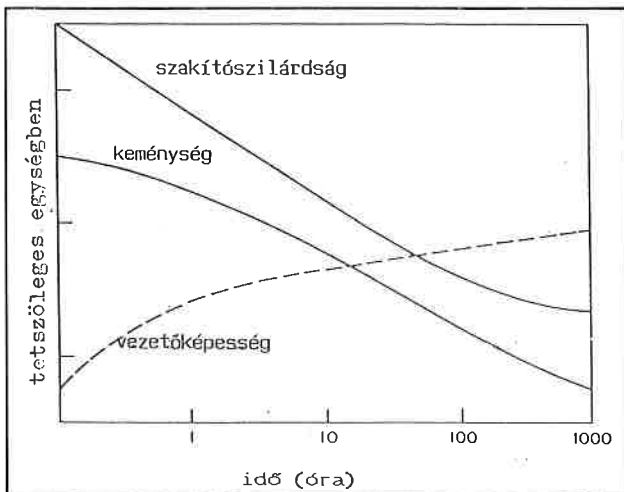
centésével a behatolási mélység nem növelhető számottevően, mert az $D/4$ -nél nem lehet nagyobb. Növelt átmérőjű tekercsnél ugyan megnő a behatolási mélység, de ez az érzékenység rovására történik, mert erősen csökken a hibaméret és a tekercs tényleges felületének a viszonya. Az érzékenység nyilvánvalóan akkor maximális, ha a detektálandó hiba méretével összemérhető a tekercs geometriája. A tekercsátmérő egy adott szinten túli növelés oda vezet, hogy bizonyos felületi és felület alatti hibák már detektálhatatlanok lesznek, ezért kb. 4 mm az a falvastagság, amely az örvényáramú mérőmethodika jelenlegi szintjén még térfogatában vizsgálható.

Az anyagjellemzők hatása

A vizsgálandó tárgy alapanyagának inhomogenitása, a felület érdesége, egyenetlensége korlátozza a hibadetektálás érzékenységét.

Nagyon kis mélységű hibák kimutatását az korlátozza, hogy azok fázisszöge alig különbözik a zérustól. A vizsgáló szonda távolságingadozása, rezgése ugyanilyen szögű kijelzést ad, ezért kellően felerősített hibajel esetén sem különböztethetők meg egymástól.

Ötvözetek inhomogenitása többnyire nem okoz problémát. Azonban, például az alumínium vezetőképessége hőkezelés, öregedés következtében – csakúgy mint a mechanikai anyagjellemzők – számottevően megváltozik, (8. ábra), ezért örvényáramú vezetőképesség-méréssel a mechanikai tulajdonságváltozás mértékére következtetni lehet.



8. ábra. A 205°C-on hőkezelt alumíniumötvözet keménységének, szakítószilárdságának és elektromos vezetőképességének változása a hűtési idő függvényében

Ötvözetekben, hegesztési varratokban létrejövő kiválások jelentős lokális ellenállás- és permeabilitás-ingadozásokat okozhatnak, amelyek csökkentik a hibadetektálás érzékenységét.

Ferromágneses anyagok örvényáramú vizsgálatát megnehezíti, hogy a hibajelek alig választhatók el a permeabilitás helyi ingadozásaitól. A permeabilitás helyi ingadozásának okai a következők lehetnek:

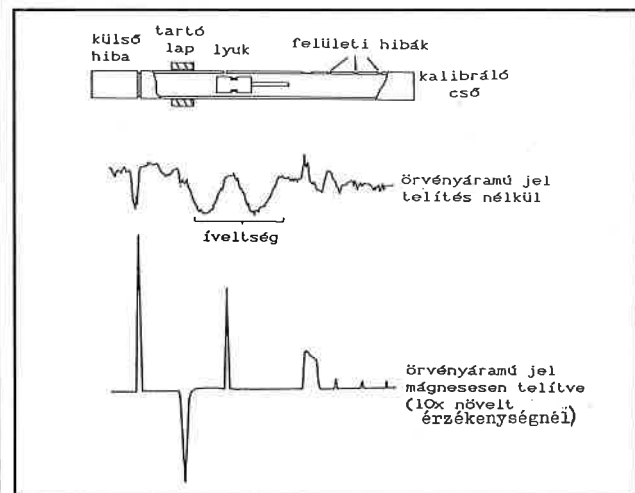
- szennyezések inhomogén eloszlása
- hőkezelési anomáliák
- hidegalakítási hatások
- maradó feszültség
- hőmérséklet különbségek

Ha változik a permeabilitás, módosul a behatolási mélység és a fázisszög is [(1) és (2) kifejezés], ezért a vektorábra kiértékelése nehezebbé válik, még akkor is, ha a hibajel és a permeabilitás jele elkülönül egymástól. Különböző vas- és acéltérmekek relatív permeabilitása tíz és több száz közötti, ezért a behatolási mélység nagymértékben csökken a nem mágnesezhető anyagokhoz viszonyítva. A mérőfrekvenciát alacsonyra választva megfelelő vizsgálati mélység ugyan elérhető, de a permeabilitás helyi ingadozásainak hatása továbbra is megmarad. Ez a vizsgálati feladattól függően, előnyös is lehet. Például a csapágygolyók gyártásához használt nagy széntartalmú, ötvözött acélhuzal felületén a melegalakítás során keletkezett rálapolós repedés mélységébe az összehegedt, dekarbonizálódott és oxidokkal kitöltött gyökert is belemé-

ri. Ez jó mert a golyógyártás szempontjából ez a hiba sem engedhető meg.

A permeabilitás és a vezetőképesség helyi ingadozásaitól eredő zavaró háttérjelek kiküszöbölésének egyik lehetséges módja a szorosan egymás mellé helyezett, két azonos tekercsből álló differenciál szonda használata. A két tekercs hibamentes felületen nem ad kimenőjelet még akkor sem, ha a tárgy és a tekercsek közötti távolság (lift-off) jelentősen megváltozik. A szondát mozgatva a hibahely fölött külön-külön mindkét tekercs ad jelet, amelyeknek eredője lesz arányos a hiba méretével. A két tekercs és a munkadarab közötti távolságot a szokásos mérték többszörösére növelve (5–10 mm) jelentősen lecsökken a permeabilitás helyi változásának a hatása a hibadetektálás érzékenységének rovására, de ez még mindig kielégítő hibadetektálást tesz lehetővé. Egyetlen felületű hegesztési varratok ilyen szondával ugyancsak eredményesen ellenőrizhetők.

Másik, gyakran alkalmazott eljárás a vizsgált munkadarab mágneses telítése, amelynek következtében az effektív permeabilitás 1.0-re csökken. Az örvényáramú vizsgálat számára az alapanyag ilyenkor lényegében nem mágnesesnek tekinthető és a hibavizsgálat abszolút tekercsrel is a megszokott módon elvégezhető. A 9. ábrán szénacél kalibrációs cső hibajelei láthatók abszolút szondával mágnesezés nélküli és felmágnesezett állapotban vizsgálva.



9. ábra. Szénacélcső hibajeleit a permeabilitás helyi ingadozásai elfedhetik. Előmágnesezéssel a tényleges hibajelek zavarmentesen erősíthetők.

Precíz hibaanalízisnél figyelembe kell venni, hogy az anyag belsejében a hibahely közvetlen környezetében lévő permeabilitás inhomogenitások miatt a hibamélység és a mért fázisszög közötti kapcsolat nem olyan egyértelmű mint a nem mágnesezhető anyagoknál. Még erőteljes előmágnesezéssel is a hibajel amplitúdója és fázisszöge a felülettől mért távolságon kívül függ a mágnesezés mértékétől és a hiba alakjától is. A hibajel amplitúdó és a jelszélesség hányadosának figyelembevételével azonban ez a zavaró körülmény is kiküszöbölhető.

Ferromágneses anyagok örvényáramú vizsgálatánál gyakran okoz problémát a munkadarab maradó mágnesezettsége, amely valamely korábbi munkafázis során keletkezhetett, például mágneses megfogás, ívhegesztés, mágnesporos repedéskeresés következtében. A maradó mágnesezettség megváltoztathatja az anyag mágneses állapotát és ezzel a kialakuló örvényáramokat is. Emiatt a legtöbb repülő- és gépkocsigyártó üzem belső szabványaiban előírja a következőket:

- örvényáramú vizsgálatra kerülő minden csapágyalkatrésznek maradó mágnesezettségtől mentesnek kell lennie;
- az örvényáramú vizsgálatoknál használt kalibráló etalonok és a vizsgálatra kerülő alkatrészek maradó mágnesezettségét meg kell mérni és azok mágnesezettsége nem lehet nagyobb mint 50 μT (0,5 gauss).

Nagy telítési indukciójú anyagoknál, pl. egyes csapágyacéloknál ennél nagyobb értékek is megengedhetők; 1 mT (10 gauss) maradó tér még nem befolyásolja számottevően az örvényáramú méréseket.

Kalibrációs etalonok

Az örvényáramú anyagvizsgálat indirekt módszer, a munkadarabok méret- és kémiai összetételbeli különbségei, az azokhoz illeszkedő nagyszámú mérőtekerccs változó paraméterei és a mérőfrekvenciától függő érzékenység miatt megbízható kvantitatív hibaméret-meghatározás csak kalibrációs etalonok segítségével kapható.

Etalonok készítésére a nemzetközi szabványok csak irányelveket adnak, azokat a felhasználók saját szükségleteiknek megfelelően maguk készítik, esetleg vásárolják.

Kalibrációs blokkokat a következő hibatípusokra szoktak készíteni:

- állandó mélységű, különböző hosszúságú repedés,
- állandó hosszúságú, különböző mélységű repedés,
- állandó mélységben változó méretű hiba,
- változó vastagságú szigetelőréteg (változó csatolási tényező),
- változó vastagságú vezetőréteg,
- ferromágneses zárvány.

Ezeket a hibatípusokat különböző anyagvastagságra, görbült felületekre, több alapanyagon megismétlik.

Vizsgálati sebesség

Az örvényáramú anyagvizsgálat sebességét a mérőszonda mérete, az üzemi frekvencia, valamint a zavaró háttérjelek kiküszöbölésére szolgáló szűrőkör és a jelregisztráló időállandója határozza meg. A gyakorlatban jeltorzulás nélkül megengedhető maximális szonda- vagy munkadarab-sebesség 0,25–0,5 m/s.

Egyes gyártó soroknál ennél lényegesen nagyobb sebességek is előfordulnak, ilyenkor azonban nincs hibaanalízis, a mérőberendezés jó vagy hibás csoportokba történő osztályozást végez.

Örvényáramú berendezések alkalmazása

Az örvényáramú vizsgálati eljárást a kohászatban többnyire felületi hibák kimutatására használják. A gyorsan mozgó, gyakran magas hőmérsékletű (200°C–1100°C) bugákat, lemezeket, huzalokat vízzel hűtött forgófejtű vagy forgó elektromágneses terű szondák ellenőrzik. Biztonsággal detektálható repedésmélység néhány tized mm. Pontosságát lényegében a felületi érdesség korlátozza, egyszerűbb mérőrendszeréknél a kimutatható repedésmélység a felületi érdesség 3–5-szöröse.

Alacsonyabb hőmérsékleten, ferromágneses alapanyagoknál, korszerűbb mérőberendezésekkel a felületi érdességgel azonos mélységű repedés is megbízhatóan indikálható.

Precíziós réz- és alumíniumhuzalok felületén a legkisebb kimutatható repedés mélysége: 0,03–0,05 mm; a legkisebb detektálható ferromágneses zárvány tömege: 0,03 mg.

Vékonyfalú csöveken, például a hőcserélők csövein, a hibadetektálás küszöbértéke 0,5–1,0 mm hosszú és a falvastagság 5–10%-át meghaladó mélységű hiba: repedés vagy korróziós gödör.

A gépkatarrészgyártásban használatos örvényáramú berendezések mérőszondái cserélhetőek, a mérési frekvencia, így a vizsgálati mélység is, széles határok között változtatható, ezért a berendezés változatos geometriájú alkatrészek vizsgálatára alkalmassá tehető. A hibadetektálás küszöbszintjét mindig a vizsgált alkatrész alak- és mérettűréséből származó mérőérés-ingadozás határozza meg. A 0,1 mm mélységű és 0,1 mm hosszúságú hiba általában könnyebb nehézség nélkül kimutatható.

A hatékony örvényáramú hibadetektálás legfontosabb kritériumai a következőkben foglalhatók össze.

- csak az örvényáram útját megszakító hibák okoznak mérhető jelváltozást;
- többféle hiba egyidejű előfordulása esetén az abszolút szondák használata általában előnyösebb, a hibafajták szétválasztása egyszerűbb;
- megbízható hibavizsgálat vektorszakópos megjelenítést igényel;
- sekély felületi hibák kimutatását az esetleges szondarezgések elfedhetik;
- kalibráló etalonokat meg kell többszörözni az elektromos vezetőképesség valamint a permeabilitás változásainak megfelelően;

- a jelenlegi berendezések 0,5 m/s-nál gyorsabb hibavizsgálatot a mért vektorábrák jelentős torzulása nélkül nem tesznek lehetővé;

- a szokásos ipari kódok és szabványok nem adnak az anyagra kielégítő jellemzést;

- minden feladatra (a permeabilitás, a fajlagos ellenállás, a behatolási mélység változásai miatt) csak kompromisszum lehet a vizsgáló frekvencia kiválasztása;

- sekély mélységű felületi hibák kimutatása durva, egyenetlen felületen nehézkes;

- az anyag inhomogenitása hamis vagy csökkent érzékenységű hibajelzést okoz;

- ferromágneses anyagok megbízható örvényáramú hibadetektáláshoz célszerű a kérdéses tárgyat mágnesesen telíteni;

- ferromágneses anyagok telítése áteresztő típusú mérőtekerccseknél lényegesen egyszerűbb, mint sík tekerccsnél;

- csövek, rudak körkörös repedéseinek kimutatására speciális mérőtekerccsek szükségesek;

- az örvényáram behatolási mélységét az anyagjellemzőkön kívül lapos tekerccsnél a tekerccsátmérő is korlátozza;

- térfogati örvényáramú vizsgálat kb. 4 mm mélységig terjedhet;

- egyidejűleg több hibafajta detektálásnál multifrekvenciás berendezésekkel a nemkívánatos háttérjelek eltüntethetők.

A mérőberendezések teljesítőképességének fokozása

Az örvényáramú anyagvizsgálat érzékenységének és pontosságának növelésére több lehetőség adódik. Ezek:

- adott feladatra optimalizált mérőszonda (fókuszált terű mérőtekerccs, forgó szonda, forgó terű vizsgálófejtű);

- mechanizált (robotizált) szondamozgatás;

- többfrekvenciás örvényáramú mérőrendszer;

- a teljes vizsgálati eljárás számítógépesítése.

A vizsgálandó feladatoknak sokfélesége következtében a mérőszondák óriási választékban készülnek. Több, külön erre szakosodott gyártó cég létezik. Egyes cégek saját mérőberendezéseikhez több száz, vagy ezernél is több mérőtekerccstípust kínálnak. A felhasználók számára problémát lényegében a saját igényeikhez optimális változat kiválasztása jelenthet.

A hibadetektálás érzékenysége több – különböző frekvenciájú – mérőcsatorna szimultán használatával is fokozható.

A hibaféleségek vektorszakópos megjelenítésének ábrája (6. ábra) alapján kiűnt, hogy azok eltérő amplitúdójúak és fázisszögűek. Értéküket a mérőfrekvencia jelentősen befolyásolja, magasabb frekvencián a külső felületi hibák jelei megnövekednek, a belsőké lecsökkennek.

Ha ugyanazon mérőtekerccsre két különböző frekvenciájú gerjesztőjel kerül, azok vektorábráin az egyes hibaféleségek amplitúdói és fázisszögei különbözőek lesznek. Az egyik jelcsatorna erősítését és fázisszögét változtatva olyan módon, hogy a nem kívánt háttérjel – a 6. ábrán pl. a tartólap, a magnetit lerakódás vagy a horpadás jele – eltüntethető legyen a két vektorábra egymásból való kivonásával. Ezzel természetesen megváltozik a detektálni kívánt hibajelek nagysága is. Ez azonban – miután kvantitatív méretmeghatározás miatt amúgy is hitelesíteni kell – nem okoz gondot. A jelcsatornák számának növelésével az eliminálható zavaró háttérjelek száma is növekszik; korszerű örvényáramú berendezések általában 3 vagy 4 független jelcsatornát tartalmaznak. A zavarójelek eltüntetésével megnövelhető az érzékenység, és így nem csak a hibadetektálás pontossága, hanem a vizsgálati mélység is fokozható, kb. 5–6 mm-ig.

Az örvényáramú mérőberendezéseknél a számítógép három különböző funkció ellátására használható:

- a mérőrendszer vezérlése: az üzemi paraméterek, méréstartományok beállítása (frekvencia, erősítés, fázisszög, szűrő, időállandók, kijelzés módja, határértékek stb.), kalibráció elvégzése, a beállított paraméterek és a mérési eredmények eltárolása;

- kommunikáció a mérőberendezéssel: az operátor ezt alfanumerikus szimbólumokkal, szöveg begépelésével végezheti, a számítógép grafikus megjelenítéssel, kinyomtatott ábrával válaszol. Alternatív lehetőség segédszámítógéppel való kommunikáció, amely átveszi a

beállítási adatokat és mérési eredményeket, új beállítási utasításokat ad, korábbi kalibrációs és mérési eredményeket hív elő.

– *gépi intelligencia használata:* a mikroprocesszor elvégzi az adathalmazok kiértékelését, adatredukciót végez, amelyek alapján a mérés ismételésére vagy folytatására hoz döntést, azonos vagy megváltoztatott üzemi paraméterekkel. Az eredményeket összeveti a kalibrációs vagy egy korábbi mérés adataival, az operátor által kívánt interpretáció szerint jeleníti meg, archiválja.

A három funkció kombinálásával lényegében teljesen automatizált vizsgálat folytatható, amelynél csak minimális beavatkozásra van szükség; a rendszer saját működését folyamatosan ellenőrzi és csak időszakosan további üzeneteket a felügyelő operátor számára a működéséről, illetve beavatkozás kérése végett.

Legnagyobb érzékenységet robotizált mozgatású, fókuszált terű mérőszondákkal érnek el. A szonda pozicionálása mozgatása, a mérés adatgyűjtése és kiértékelése számítógéppel automatikusan történik. Ilyen mérőrendszerrel pl. repülőgép-gázturbína tárcsáinak vizsgálatánál 0,3 mm átmérőjű hibákat 1 mm mélységben megbízhatóan ki lehet mutatni. A szondamozgató robot költsége azonban a mérőrendszer árának tízszeresét is meghaladja.

A legnagyobb mértékben automatizált örvényáramú mérőrendszereket a nukleáris energiatermelés számára fejlesztették ki. Az atomreaktor primerkörében lévő gőzgenerátorok 10–16 ezer vékonyfalú (0,86–1,2 mm), 16–24 mm átmérőjű csövet tartalmaznak, amelyek szokásos üzemi hőmérséklete meghaladja a 300°C-ot, belső nyomása 15 MPa nagyságrendjébe esik. A gőzgenerátorok tervezett élettartama 40 év. Ezalatt, a szigorú biztonsági követelmények miatt, a hőcserélőt időközönként ellenőrizni kell. Mivel a leállítás rendkívül költséges, az energiatermelés kiesése napi több millió dollár veszteséget jelent, ezért csak olyan vizsgálati eljárás jöhet szóba, amely nagyon gyors, automatizált és a sugárveszély miatt teljes mértékben robotizált.

Az e célra kifejlesztett, számítógéppel vezérelt robot juttatja be a vizsgálni kívánt csőbe az örvényáramú mérőszondát, amelyet sűrített levegő szállít végig a cső belsejében és a haladás közben kapott örvényáramú jeleket a számítógép tárolja. A 16 mm átmérőjű csőben haladó vizsgálófej nyolc egymástól független mérőtekeréscset tartalmaz; ezek mindegyikét három különböző frekvenciájú jelforrásról táplálják. A kapott örvényáramú jeleket 24 csatornán erősítik, ezek kimeneteinek megfelelő kombinációival a zavaró háttérjelek kiejthetők és az egyes hibafajták egyértelműen azonosíthatókká tehetők. A károsodások mértékét a falvastagság százalékos arányában adják meg. 10% falvastagságnyi hiba (külső, belső repedés, korróziós, eróziós folt, lerakódás, átlukadás stb.) mérési pontossága tipikusan $\pm 20\%$, a méret fölött $\pm 10\%$.

Gazdasági szempontok

Az örvényáramú és egyáltalán a roncsolásmentes anyagvizsgálat haszna nyilvánvaló, de annak számszerűsítésére vonatkozóan ténylegesen kevés kalkuláció található.

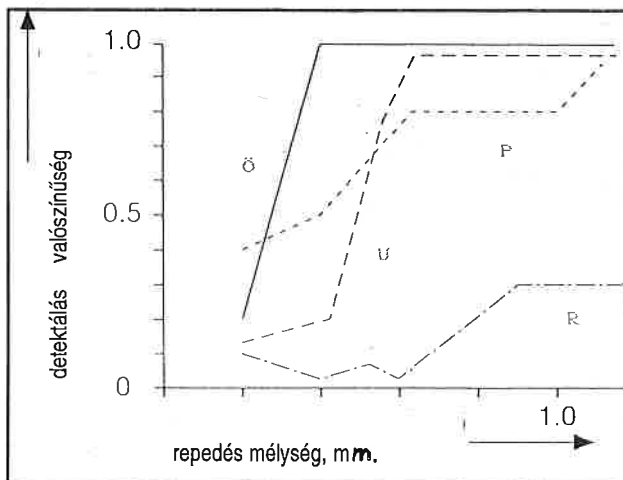
Az Amerikai Légiközlekedési Egyesülés által készített tanulmány a repülőgépipari felhasználásra kerülő termékek megbízhatósága, tényleges üzemeltetési ideje és meghibásodása, valamint azok előzetes roncsolásmentes vizsgálatára fordított költségeket veti egybe; illetve azt vizsgálja, hogy az egyes kritikus alkatrészek, szerkezeti elemek kezdeti minősége, megbízhatóságának fokozása, ellenőrzésükre fordított költségek milyen mértékben hatnak a gépek fenntartási kiadásaira. A fontosabb termékcsoportok: öntvények, hajtóművek és géptestek minőségbiztosítása, azok roncsolásmentes ellenőrzése – kimutatásuk szerint – az eladási ár 1,1, 0,67 és 0,27 százalékát teszi ki [6]. Ezért a hosszabb üzemeltetési idő és várható élettartam miatt a roncsolásmentes anyagvizsgálatok színvonalát és az arra fordított beruházásokat mindenképpen növelni kívánják.

A fokozott minőségű alkatrészek következtében elérhető megtakarításra egy jellegzetes példa a motorcsapágyak gyártási és ellenőrzési költségeinek összehasonlítása az elhasználódás miatt szükségessé váló cserék költségével. Egy új csapágy a csere árának 2%-át sem

éri el, ezért egy kétszer drágább, jobb minőségű csapágyat már akkor is érdemes beépíteni, ha az csak 2%-kal csökkenti a meghibásodás gyakoriságát. Fokozott minőségű alapanyag, többszörös gyártásközbéli ellenőrzés a kész csapágy árát ténylegesen 0,04%-kal növeli, a hosszabb élettartam ugyanakkor a javítási költségeket 75%-kal csökkenti.

Ha az alkatrész árát a károsodása miatti hajtóműleállás költségével vetik egybe, akkor ezek viszonya legalább százszoros, amely esetenként még sokkal nagyobb is lehet (tipikusan 700-szoros), mivel a csapágyhiba néha (kb. 20%-ban) járulékos károsodásokat is okoz. Ha a példa bizonyos mértékig kihegyezettnek is látszik, nyilvánvaló, hogy az egyes termékekre vonatkozó igénybevétel ismeretében nagyon fontos annak meghatározása, hogy az elérni kívánt élettartam milyen anyagminőséget és milyen színvonalú minőségellenőrzést igényel.

Ugyancsak nagyon fontos az optimális vizsgálati eljárás megválasztása. Egy adott feladat, pl. repedések kimutatása, egymástól nagyon különböző módszerrel (ultrahangos, örvényáramos, folyadék-behatolós) is elvégezhető. Ezek nemcsak különböző költségűek és eltérő érzékenységek (9. ábra), hanem az ellenőrzésre fordított időigényük is számottevően különbözhet. A SAS légitársaságnál végzett felmérés szerint [6] a repülőgépeknél előírt időszakos biztonsági felülvizsgálat ultrahangos módszerrel mintegy 500 munkaórát igényel, amely a tényleges méréseken kívül a festékrétegek, tömítések eltávolítására, illetve helyreállítására fordított időt is magába foglalja.



10. ábra. Egy 3,2 mm vastag alumíniumlemez felületi repedéseinek detektálási valószínűsége különböző vizsgálati eljárásokkal. (Ö – örvényáram, U – ultrahang, P – folyadékbehatolós, R – radiográfia)

Örvényáramú eljárással, egyrészt kisebb felületi hibák is biztonságosan kimutathatók, másrészt az átvizsgálási idő jelentősen, kb. 65 órára lecsökkent, amely 770%-os munkaóra megtakarítást eredményezett. Egy repülőgép kivonása a forgalomból napi 25–50 ezer USD veszteséget jelent, ezért az új módszer bevezetése nagyon hamar megtérült.

Irodalom

- [1] H. L. Libby: Introduction to Electromagnetic Non-Destructive Test Methods. Wiley-Interscience, New York 1971.
- [2] R. C. McMaster: Non-Destructive Testing Handbook. American Society For Non-Destructive Testing Inc., 1986.
- [3] Kajdi Gy.: Anyagvizsgálat örvényáramokkal. Szakmai Továbbképző és Átképző Vállalat, Budapest 1990.
- [4] Tóth F.: Örvényáramú Roncsolásmentes Anyagvizsgálat. Anyagtudományi Műszerközpont, Budapest 1989.
- [5] V. S. Cecco, G. Van Drunen, F. L. Sharp: Eddy Current Testing Manual Atomic Energy of Canada AECL-7523, 1981.
- [6] D. Hagemeyer: Cost Benefits of Non-Destructive Testing in Aircraft Maintenance. ASNT Spring Conference, Orlando, Florida Apr 11–15 (1988).